T. Lazăr
N. Petre

Elemente încălzitoare electrice în tuburi metalice

95

colecția electricianului

editura tehnică

Ing. Tiberiu Lazăr Ing. Nicolae Petre

Elemente încălzitoare electrice în tuburi metalice

95

Editura tehnică
București

1. Generalităţi

Marele succes şi aplicaţiile largi de utilizare ale elementelor încălzitoare electrice în tuburi metalice, se datoresc în mare măsură proprietăţilor acestora de a putea fi adaptate în spaţii restrînse, sub diverse forme constructive păstrînd în acelaşi timp caracteristici optime de rezistenţă mecanică. Datorită diversităţii, flexibilităţii şi insensibilităţii relative la solicitări mecanice, acestea servesc adesea ca soluţie ideală şi unică în tehnica încălzirii. Căldura degajată de către acestea poate fi transmisă mediului înconjurător prin conducţie, convecţie şi radiaţie în funcţie de temperatura de funcţionare şi metoda de utilizare. Ele se utilizează pînă la temperaturi de 850°C, într-o mare varietate de scopuri industriale şi casnice. Astfel, sînt frecvent utilizate ca încălzitoare imersate în diverse lichide (plonjoare) şi realizate în diverse variante constructive, funcţie de gradul de coroziune al lichidului în care lucrează, sau pentru realizarea unei temperaturi cît mai uniforme, mărirea suprafeţei de disipare realizîndu-se prin aplicarea pe tub a aripioarelor de răcire sau înglobarea lui în corpuri metalice prin turnare sau presare. Elementele încălzitoare electrice în tuburi metalice mai sînt folosite în diverse tipuri de încălzitoare prin radiaţie şi baterii de aer cald, în care elementul transmite căldura unui curent de aer mai mult sau mai puţin ventilat.

În zilele noastre, cînd problemele energetice sînt de primă importanţă, utilizarea elementelor încălzitoare

electrice în tuburi metalice se impune atît prin eficiența lor, cît și prin folosirea judicioasă a materiilor prime și a curentului electric.

Elementul încălzitor electric în tub metalic este un ansamblu electrotermic format din unul sau mai multe spirale de încălzire, fixate într-o poziție stabilă în interiorul unui tub metalic și izolate de tub cu un material electroizolant. Părțile principale ale elementului încălzitor electric în tub metalic (v. fig. 1.1) sînt următoarele:

— *Tubul metalic* al elementului încălzitor electric construit din țeavă de cupru, alamă, aluminiu, oțel inoxidabil sau alte metale sau aliaje, funcție de mediul și temperatura de exploatare;

— *Materialul izolant* care se află împrejurul spiralei de încălzire și asigură izolația electrică între părțile sub tensiune și alte părți metalice ale elementului încălzitor în tub metalic;

— *Spirala de încălzire* executată de obicei în formă elicoidală cilindrică din sîrmă sau bandă, realizată din material cu rezistivitate ridicată și care transformă energia electrică în energie termică;

— *Fișa de contact* ce servește la racordarea spiralei de încălzire la rețeaua de alimentare. Este prevăzută, în acest scop, la capătul din afara tubului cu mijloace de contact (cleme) sau cu filet și piuliță;

— *Izolatorii de ghidare* asigură centrarea știftului de contact la capătul tubului metalic;

— *Izolatorii de capăt*, cu rol de centrare a știftului de contact la capetele tubului, de închidere pentru etanșare și protecție a materialului izolant împotriva umezelii.

— *Elementele de fixare mecanică*, din care fac parte mufe, flanșe, suporturi etc., cu care se prevede tubul pentru montarea elementului încălzitor electric în tub la aparatele și instalațiile de încălzit;

Lungimea tubului se împarte în: lungimea activă L_a care constituie partea tubului în care se așază spirala de încălzire și lungimea inactivă L_i, care este partea de la cele două capete ale tubului ocupată de fișele de con-

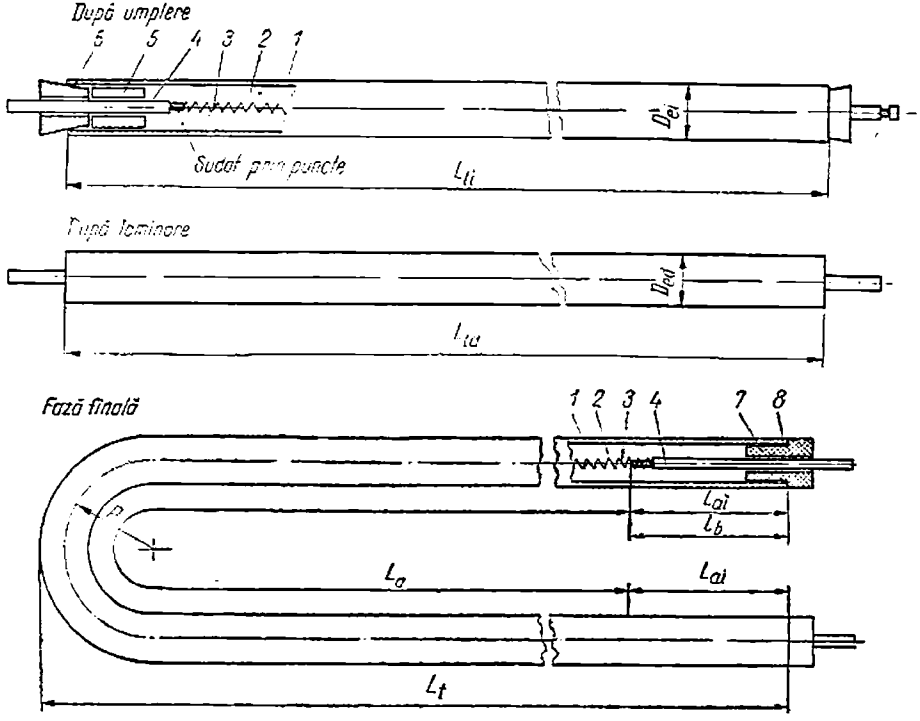


Fig. 1.1. Element încălzitor în tub metalic;

1 — tub; *2* — material izolant; *3* — sîrmă de rezistență; *4* — fișă; *5* — izolator de ghidare; *6* — dop de închidere; *7* — izolator de capăt; *8* — material de închidere; D_{ei} — diametrul exterior înainte de comprimare; D_{ed} — diametrul exterior după comprimare; L_{ai} — lungimea activă înainte de comprimare; L_b — lungimea fișei; L_{ti} — lungimea totală înainte de comprimare; L_{td} — lungimea totală după comprimare; L_t — lungimea totală a tubului, L_a — lungimea activă după comprimare.

tact. Lungimea totală L_t este suma lungimilor active și inactive, adică:

$$L_t = L_a + L_i$$

sau

$$L_t = L_a + 2L_b$$

unde: L_b este lungimea fișei de contact aflat în tub; valorile lui sînt date în tabelul de mai jos.

Lungimea tubului, în mm	120 la 350	350 la 600	600 la 3 500
Lungimea fișei de contact, L_b, în mm	15 la 25	25 la 75	75 la 105

Lungimea desfășurată este suma lungimilor drepte și curbate ale elementului încălzitor electric în tub metalic.

Limitele lungimilor totale realizate în mod curent variază între 120 și 3 500 mm, iar diametrele între 6 și 12 mm.

Diametrul exterior al tubului după comprimare D_{ed} este diametrul la care ajunge tubul în urma procesului tehnologic de reducerea secțiunii prin laminare, forjare etc. Diametrul interior al tubului după comprimare D_{id} este diametrul la care ajunge tubul în urma procesului tehnologic de reducerea secțiunii prin laminare, forjare etc.

Lungimea tubului după comprimare L_{td} este lungimea la care ajunge tubul în urma procesului tehnologic de comprimare.

Gradul de reducere al tubului este raportul între diametrul tubului după comprimare și cel dinainte de comprimare.

Coeficientul de alungire al tubului după comprimare „a" este raportul între lungimea tubului înainte de comprimare L_{ti} și cea după comprimare L_{td}.

Suprafața activă F este suprafața tubului pe lungimea lui care conține spirala de încălzire.

Viteza de coroziune se exprimă prin cantitatea de metal distrusă în unitate de timp, sau în adîncimea de metal corodată în unitate de timp. În practică se consideră că metalul cu densitatea de 7—8 g/cm^3 ca fiind rezistent, dacă viteza de coroziune este de 0,1 $g/m^2 \cdot h$ și acceptabil chiar la 1 $g/m^2 \cdot h$.

La majoritatea materialelor metalice (mai ales la aliajele fier-carbon) există o echivalență între cele două moduri de a exprima coeficientul de coroziune, adică valoarea coeficientului exprimat în mm/an este aceeași cu cea exprimată în $g/m^2 \cdot h$.

Caracteristicile principale ale elementelor încălzitoare electrice în tub sînt: tensiunea de lucru, puterea specifică, temperatura de lucru, regimul termic stabilizat și grosimea stratului izolant.

În prezent, se produc elemente încălzitoare electrice în tub pentru următoarele tensiuni nominale:

— 6; 12; 24; 42; 127; 220 V — curent alternativ monofazat;

— 220; 380 V — curent alternativ trifazat;

— 6; 12; 24; 48; 110; 220 V — curent continuu.

Puterile elementelor încălzitoare electrice în tub pot fi cuprinse între 5 și 3 000 W.

Puterea specifică a tubului/spiralei de încălzire este o caracteristică deosebit de importantă și reprezintă puterea care revine pe 1 cm^2 din suprafața activă a tubului/spiralei de încălzire.

Temperatura de lucru, în °C, este temperatura pe partea activă a elementului încălzitor electric în tub, în regimul termic stabilizat la consumul nominal de energie electrică.

Regimul termic stabilizat este starea elementului încălzitor electric în tub la care se stabilește echilibrul termic între el și mediul ambiant de încălzit.

Grosimea minimă a stratului izolant între părțile sub tensiune și alte părți metalice ale elementului încălzitor electric în tub este de minimum 1 mm.

Domeniul de utilizare. Căldura dezvoltată în elementele încălzitoare electrice tubulare poate fi transmisă mediului înconjurător prin conducție, convecție sau radiație, în funcție de condițiile de funcționare pentru care au fost construite și de caracteristicele constructive și fizico-mecanice ale materialelor din care au fost confecționate părțile componente ale E.I.T.-ului. În acest sens, în cazurile în care tubul se execută din cupru, la care temperatura admisibilă este de 250°C, elementul încălzitor se utilizează în special pentru încălzirea apei și a soluțiilor ce nu corodează cuprul pentru: boilere electrice, fierbătoare de ceai și cafea, mașini de spălat rufe, aparate de sterilizare, instalații de distilare, preîncălzitoare pentru motoare termice etc. În cazul folosirii oțelului, la care temperatura admisibilă este de 400°C, elementele încălzitoare sînt utilizate în industrie ca: încălzitoare de aer, schimbătoare de căldură, cuptoare de uscare, băi de ulei etc.

Elementele încălzitoare în tub sînt folosite și pentru încălzirea corpurilor solide, în care elementele încălzitoare electrice sînt înglobate prin turnare sau prin presare în canale etc., fiind asigurată astfel o cedare bună de căldură.

Pentru temperaturi de 700—850°C, situații în care se folosesc pentru tub oțeluri aliate (inoxidabile), elementele încălzitoare electrice în tub sînt utilizate pentru încălzire prin radiație a aerului, a gazelor, a lichidelor, sărurilor, mediilor corozive și înglobate în metal la: încălzitoare pentru scule de presat și injectat mase plastice, cuptoare de tratament termic, uscătoare de miezuri și forme în turnătorii, cuptoare de uscat lacuri, instalații de vulcanizare etc.

În figurile 1.2—1.3 sînt arătate principalele elemente încălzitoare electrice în tub produse în țară. Caracteristicile funcționale și constructive ale acestora sînt date în tabelul 1.1 (planșă).

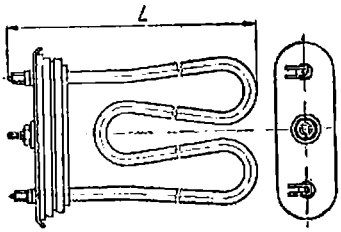


Fig. 1.2. Element încălzitor pentru mașină automată de spălat rufe.

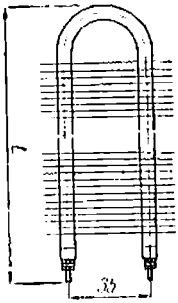


Fig. 1.3. Element încălzitor pentru radiator postconducere locomotivă diesel-electrică.

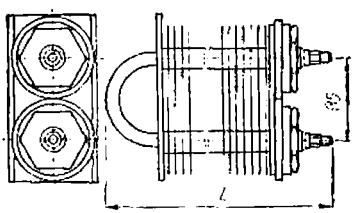


Fig. 1.4. Element încălzitor pentru mecanism oleo-pneumatic ale întreruptoarelor de înaltă tensiune.

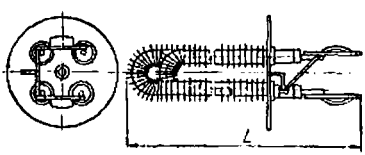


Fig. 1.5. Corp încălzitor pentru vagoane de călători.

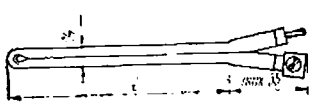


Fig. 1.6. Element încălzitor pentru încălzirea matrițelor de formare la cald cu puteri pînă la 750 W.

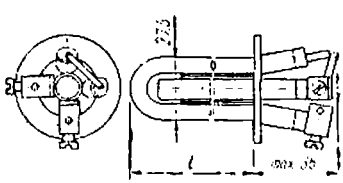


Fig. 1.7. Element încălzitor pentru încălzirea matrițelor de formare la cald cu puteri între 850 și 1 500 W.

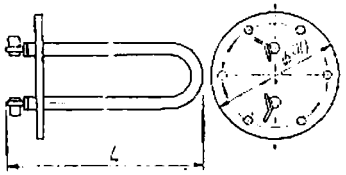


Fig. 1.8. Element încălzitor pentru radiator electric cu ulei cu puteri între 1 000 și 2 000 W.

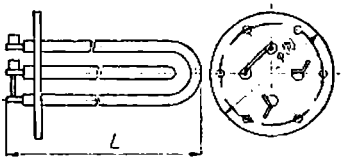


Fig. 1.9. Element încălzitor pentru radiator electric cu ulei cu puteri între 900 W și 1 800 W.

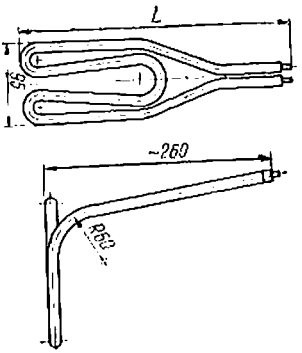


Fig. 1.10. Încălzitor de apă prin imersie.

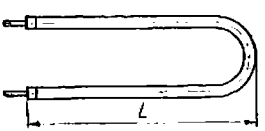


Fig. 1.11. Element încălzitor cu utilizare multiplă cu lungimea tubului pînă la 1 250 mm.

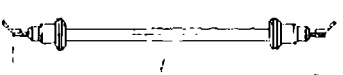


Fig. 1.12. Element încălzitor cu utilizare multiplă cu lungimea tubului pînă la 3 000 mm.

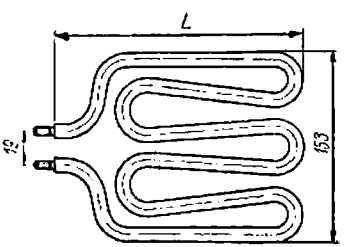


Fig. 1.13. Element încălzitor pentru grătare electrice.

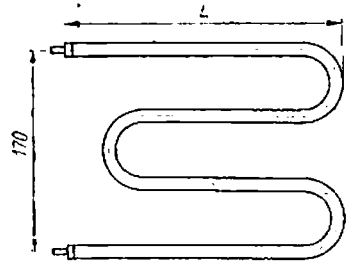


Fig. 1.14. Element încălzitor pentru plite electrice cu cuptor.

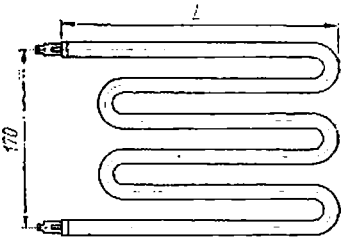


Fig. 1.15. Element încălzitor pentru agregatul de încălzire, locomotive electrice.

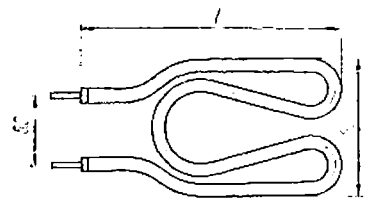


Fig. 1.16. Element încălzitor pentru mașina de spălat rufe la 220 V.

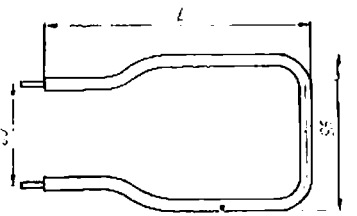


Fig. 1.17. Element încălzitor pentru mașina de spălat rufe la 110 V.

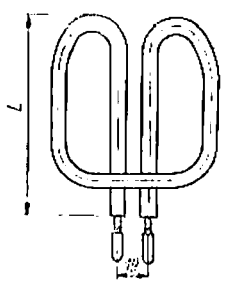


Fig. 1.18. Element încălzitor pentru incubator.

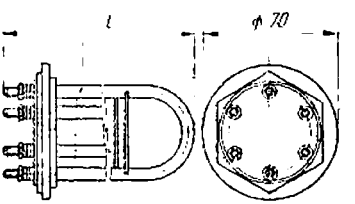


Fig. 1.19. Încălzitor de apă pentru motoarele locomotivelor diesel.

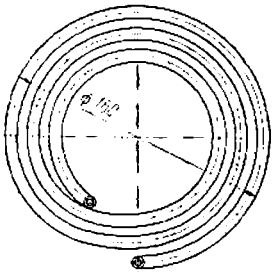


Fig. 1.20. Element încălzitor pentru reşourile locomotivelor electrice.

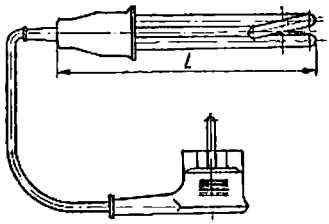


Fig. 1.21. Încălzitor de apă prin imersie (termoplonjor) cu putere de 400 W.

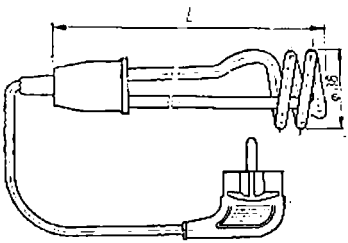


Fig. 1.22. Încălzitor de apă prin imersie (termoplonjor) cu putere de 500 W.

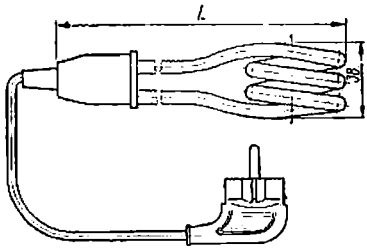


Fig. 1.23. Încălzitor de apă prin imersie (termoplonjor) cu putere de 750 W.

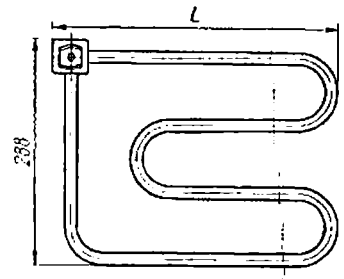


Fig. 1.24. Element încălzitor pentru camere frigorifice navale, cu putere de 2 000 W.

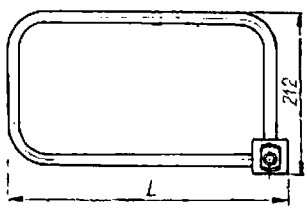


Fig. 1.25. Element încălzitor pentru camere frigorifice navale cu putere de 50 W.

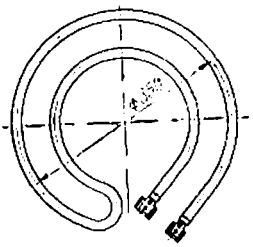


Fig. 1.26. Element încălzitor pentru incubatoare.

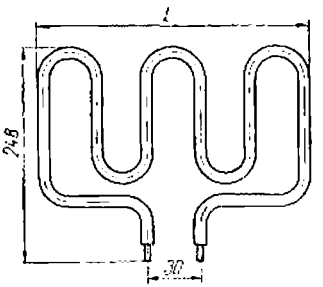


Fig. 1.27. Element încălzitor pentru mașina de gătit electrică, cu putere de 2 000 W.

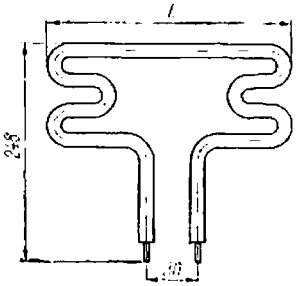


Fig. 1.28. Element încălzitor pentru mașina de gătit electrică cu putere de 1 200 W.

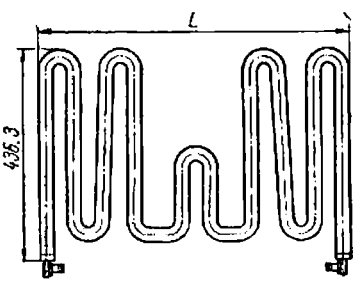


Fig. 1.29. Element încălzitor pentru producerea aburului supraîncălzit în saune.

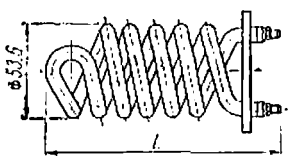


Fig. 1.30. Element încălzitor pentru încălzitor de apă curentă.

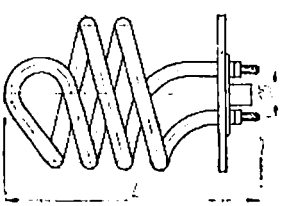


Fig. 1.31. Element încălzitor pentru încălzitor de apă cu acumulare.

2. Noţiuni de electrotehnică şi termotehnică

Intensitatea curentului electric I este cantitatea de electricitate care trece printr-o secţiune transversală a conductorului în unitate de timp, adică

$$I = \frac{Q_e}{T} \text{ [A]}, \tag{2.1}$$

unde:

Q_e este cantitatea de electricitate, în coulombi (C);

T — timpul, în secunde (s).

Rezistenţa electrică a unui conductor se calculează folosind relaţia:

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ [}\Omega\text{]}, \tag{2.2}$$

în care:

ρ este rezistivitatea conductorului, în $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$;

l — lungimea conductorului, în m;

S — secţiunea conductorului, în mm^2.

Rezistivitatea şi respectiv rezistenţa unui conductor variază cu temperatura. În general, rezistenţa unui conductor creşte cu temperatura.

Rezistivitatea ρ la temperatura t, în funcţie de rezistivitatea ρ_0 la temperatura t_0, este dată de relaţia:

$$\rho = \rho_0[1 + C_t(t - t_0)], \tag{2.3}$$

în care: C_t este coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura (valoarea lui fiind dată în tabelele 3.1—3.6, 3.8, 3.9, 3.13 și 3.17).

Rezistența R_t la temperatura t se determină printr-o relație asemănătoare:

$$R_t = R_0[1 + C_t(t - t_0)] \ [\Omega]. \tag{2.4}$$

Inversul rezistenței unui conductor se numește *conductanță* G a conductorului:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{l} = \gamma \frac{S}{l}, \tag{2.5}$$

în care $\gamma = \frac{1}{\rho}$ este conductivitatea materialului, în Siemens (S).

Legea lui Ohm. Curentul electric I care trece printr-o rezistență R la capetele căreia se aplică o tensiune electrică U (o diferență de potențial) se calculează folosind relația:

$$I = \frac{U}{R} [\text{A}] \tag{2.6}$$

în care: I se măsoară în A, U în V și R în Ω.

Produsul IR este căderea de tensiune produsă la trecerea curentului I prin rezistența R.

Rezistențele electrice pot fi legate în serie, în paralel și mixt.

Rezistențe legate în serie. Căderea de tensiune totală în rezistențele legate în serie este egală cu suma căderilor de tensiune din fiecare rezistență, deci:

$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$$

sau

$$RI = R_1 I + R_2 I + \ldots R_n I.$$

Deoarece curentul I este același în toate rezistențele legate în serie, rezultă că rezistența echivalentă R a mai multor rezistențe R_1, $R_2 \ldots R_n$ legate în serie este egală cu suma acestor rezistențe:

$$R = R_1 + R_2 + \ldots R_n \ [\Omega]. \tag{2.7}$$

Rezistențe legate în paralel. Curentul total care trece prin rezistențele legate în paralel este egal cu suma curenților care trec prin fiecare rezistență:

$$I=I_1+I_2+\ldots+I_n.$$

Deoarece tensiunea U la bornele rezistențelor este aceeași pentru toate rezistențele, se poate scrie:

$$\frac{U}{R}=\frac{U}{R_1}+\frac{U}{R_2}+\ldots+\frac{U}{R_n},$$

de unde rezultă:

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\ldots+\frac{1}{R_n} \qquad (2.8)$$

În cazul a două rezistențe legate în paralel

$$R=\frac{R_1\cdot R_2}{R_1+R_2}[\Omega]. \qquad (2.9)$$

Legarea mixtă a rezistențelor. În diverse instalații rezistențele electrice pot fi legate în serie și în paralel. Acest mod de legare a rezistențelor se numește legare mixtă.

Rezistența echivalentă a montajului de rezistențe legate mixt se deduce cu ajutorul expresiilor stabilite pentru determinarea rezistențelor legate în serie și în paralel.

Puterea electrică este energia electrică raportată la timpul în care ea este produsă sau absorbită. Valoarea ei este dată în formula:

$$P=\frac{W}{T}. \qquad (2.10)$$

Puterea electrică absorbită de o rezistență R este:

$$P=RI^2=UI=\frac{U^2}{R}[\mathrm{W}], \qquad (2.11)$$

de unde:

$$R=\frac{U^2}{P}[\Omega], \qquad (2.12)$$

formulă mult folosită la dimensionarea spiralelor de încălzire.

Cantitatea de căldură poate fi definită ca fiind cantitatea de energie cinetică cu care crește sau scade energia internă a unui corp în procesul de încălzire sau de răcire a acestuia.

Unitatea de măsură a cantității de căldură în sistemul de unități MKfS este caloria* (cal). Caloria este cantitatea de căldură care trebuie transmisă unui gram de apă distilată pentru a-i ridica temperatura cu 1°C de la 14,5°C la 15,5°C, sau de la 19,5°C la 20,5°C.

În practică, se folosește un multiplu al caloriei, kilocaloria (kcal) egală cu 1 000 de calorii. Kilocaloria este cantitatea de căldură care trebuie transmisă unui kilogram de apă distilată, pentru a-i mări temperatura cu 1°C.

Căldura masică. Cantitatea de căldură care trebuie transmisă unității de masă dintr-o substanță pentru a-i ridica temperatura cu 1°C se numește căldură masică. Experimental s-a constatat că pentru a ridica temperatura cu același număr de grade la diferite corpuri care au mase egale, dar constituite din substanțe diferite, sînt necesare cantități de căldură diferite. Astfel, de exemplu: pentru a încălzi 1 g de apă cu 1°C este nevoie de 1 cal; pentru 1 g de aluminiu de 0,214 cal; pentru 1 g de fier de 0,108 cal; iar pentru 1 g de plumb de numai 0,031 cal.

Căldura specifică raportată la unitatea de masă se exprimă în calorii pe gram și pe grad celsius (cal/g·°C). După cum rezultă din cele de mai sus, căldura specifică a apei este: c=1 cal/g·°C; a aluminiului — 0,214 cal/g·°C; a fierului — 0,108 cal/g·°C, iar a plumbului — 0,031 cal/g·°C.

La substanțe gazoase, căldura specifică mai depinde și de condițiile în care se face încălzirea. Dacă încălzirea se realizează la presiune constantă, căldura specifică se numește căldura specifică la presiune constantă, dacă însă la încălzire se menține volumul constant, căldura specifică se numește căldura specifică la volum constant. Aceste călduri specifice diferă de la o substanță gazoasă la alta,

* *Caloria* este înlocuită cu unitatea de măsură a energiei din sistemul internațional (SI) — *Joule* [J] 1 cal=4,1868 J.

iar la aceeaşi substanţă, ambele variază în funcţie de temperatură.

Cantitatea de căldură Q, primită sau cedată de un corp este egală cu produsul dintre căldura specifică c, masa corpului m şi variaţia de temperatură $(t_1—t_2)$ pe care o suferă:

$$Q=m\cdot c\ (t_2—t_1)\ \text{[kcal sau kJ]}. \qquad (2.13)$$

În consecinţă, dacă se cunoaşte căldura specifică a unui corp de masă m, se poate calcula cantitatea de căldură necesară pentru a încălzi acel corp cu un anumit număr de grade.

În cazul în care se cunoaşte cantitatea de căldură necesară încălzirii unui corp, puterea electrică se calculează cu formula*:

$$P=\frac{1{,}16}{1\,000}\cdot\frac{1}{\eta}\cdot\frac{1}{T}\cdot Q\ \text{[kW]}, \qquad (2.14)$$

în care:

η este randamentul instalaţiei;

T — timpul de încălzire, în h;

Q — cantitatea de căldură teoretic necesară, în kcal.

De asemenea se cunoaşte că echivalentul caloric al curentului electric este:

$$1\ \text{kWh}=3\,600\ W_s=860\ \text{kcal}. \qquad (2.15)$$

Transmiterea căldurii este procesul fizic prin care căldura trece de la corpurile cu temperaturi mai înalte la cele cu temperaturi mai joase, proces ce are loc pînă în momentul cînd temperaturile acestora devin egale. Această egalitate se stabileşte într-un anumit timp în care energia termică se transmite de la corpul cu potenţialul energetic mai ridicat către corpul cu potenţialul energetic mai scăzut.

---

* Dacă căldura se exprimă în kJ, atunci puterea electrică se calculează cu relaţia: $P=\frac{1}{3\,600}\cdot\frac{1}{\eta}\cdot\frac{1}{T}\cdot Q$ [kW].

În funcție de condițiile care caracterizează modul de transmitere, acesta se poate realiza prin conducție, convecție și radiație.

Transmiterea căldurii prin conducție. Conducția este schimbul de căldură la care propagarea căldurii se face de la o particulă la alta în interiorul corpului. Acest tip de schimb de căldură se produce în corpurile solide.

— Conducția căldurii prin pereții plani. Cantitatea de căldură care trece în unitate de timp printr-un perete de 1 m² fețele avînd temperaturile de t_2 și t_1 este:

$$q=\frac{\lambda}{\delta}(t_2-t_1) \text{ [kcal/m}^2\cdot\text{h, sau W/m]} \qquad (2.16)$$

unde:

λ este conductivitatea termică*, în kcal/m·h·°C sau W/m·°C;

δ — grosimea peretelui traversat de fluxul de căldură, în m;

t_2 și t_1 sînt temperaturile punctelor între care a fost măsurată distanța δ, în °C.

Cantitatea de căldură care trece printr-o suprafață oarecare S într-o oră este egală cu:

$$\Phi=q\cdot S \quad \text{[kcal/h sau W]} \qquad (2.17)$$

— Conducția căldurii prin pereții țevilor. Cantitatea de căldură Q, transmisă în unitate de timp printr-o țeavă cu diametrul interior d_i, în m, diametrul exterior d_e, în m, și lungimea l, în m, cu temperatura peretelui interior de t_2 și cea a peretelui exterior t_1, cu un coeficient de conductivitate termică λ, se calculează cu formula:

$$Q=\frac{2\pi\lambda}{\ln\frac{d_e}{d_i}}\cdot l(t_2-t_1) \quad \text{[kcal/h sau W]}$$

* 1 kcal/m·h°C = 1,163 W/m°C.

respectiv

$$Q=\frac{2\pi\lambda}{2{,}3\log\frac{d_e}{d_i}}\cdot l(t_2—t_1) \quad \text{[kcal/h sau W]} \qquad (2.18)$$

Transmiterea căldurii prin convecție. Propagarea căldurii prin convecție se face prin deplasarea particulelor materiale încălzite dintr-un loc în altul. Se formează astfel un transport de materie și cu aceasta un transport de căldură între un fluid (în mișcare) și suprafața unui corp solid cu care acesta vine în contact direct. Încălzirea încăperilor de la sobe sau calorifere se realizează datorită transmiterii căldurii prin convecție. O astfel de propagare a căldurii se numește convecție naturală. Dacă curentul de fluid este datorit unei forțe de altă natură (ventilator etc.) convecția se numește forțată.

Ecuația cantității de căldură Q transmise prin convecție este:

$$Q=\alpha'\cdot S'\cdot T(t_2—t_1) \quad \text{[kcal* sau kJ]} \qquad (2.19)$$

unde:

α' este transmisivitatea*, în kcal/m²·h·°C sau kJ/m²·h·°C;
S' — suprafața de contact, în m²;
T — timpul, în ore;
t_2 — temperatura peretelui, în °C;
t_1 — temperatura fluidului, în °C.

Coeficientul de convecție α' reprezintă cantitatea de căldură schimbată într-o oră, prin convecție, printr-o suprafață de 1 m² la o diferență de temperatură de un grad. Valorile numerice ale coeficientului α' se stabilesc pe cale experimentală pentru diferite cazuri întîlnite în practică.

Transmiterea căldurii prin radiație. Radiația este fenomenul de trecere a căldurii de la un corp la altul sub formă de unde electromagnetice cu efect termic, care se numesc radiații termice.

---

* 1 kcal/h=1,163 W;
1 kcal/m²hK⁴=1,163 W/m²K⁴.

Relația de calcul a schimbului de căldură prin radiație între două corpuri cu temperaturile absolute T_2 și respectiv T_1 ($T_2 > T_1$) este:

$$Q = CS_r\left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right] \text{[kcal/h*, sau W]} \qquad (2.20)$$

în care:

C este constanta de emisie a sistemului*, în

$$\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4 \text{ sau } \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4;$$

S_r — suprafața de radiație, în m^2;

Temperaturile absolute sînt stabilite astfel:

$$T = t + 237^\circ\text{C} \quad \text{[K]}$$

Dacă ε_1 și ε_2 sînt coeficienții de absorbție a două suprafețe plane paralele, C se calculează cu relația:

$$C = \frac{4{,}96}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

* $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = 4{,}186 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = 1{,}163 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.
1 kcal = 4,186 kJ.

3. Materiale folosite în fabricația părților componente ale elementelor încălzitoare în tuburi metalice

3.1. Materiale pentru sîrma de rezistență

Pentru construcția sîrmelor de rezistență se utilizează materiale cu rezistivitate cît mai mare în scopul obținerii unor dimensiuni cît mai mici. Aceste materiale trebuie să aibă un coeficient de variație a rezistivității cu temperatura cît mai mică pentru a le asigura stabilitatea la variații de temperatură. De asemenea, ele trebuie să reziste timp îndelungat la temperaturi ridicate fără a se topi.

Pe lîngă aceste condiții ele trebuie să satisfacă o serie de cerințe tehnologice și economice și anume: să se prelucreze ușor, să se înfășoare ușor în spirală pe diferite dispozitive și utilaje, să fie rezistente din punct de vedere mecanic la prelucrare, să nu fie deficitare și să aibă un preț de cost cît mai redus.

Materialele ce îndeplinesc condițiile impuse mai sus sînt aliajele de mare rezistivitate, respectiv aliaje ale fierului sau ale nichelului cu metale care măresc rezistența la căldură: crom, aluminiu, siliciu.

Aliajele folosite în construcția elementelor încălzitoare electrice în tub pot fi clasificate astfel:

— aliaje pe bază de nichel și crom (nicrom, cromnichel);

— aliaje pe bază de fier, crom și aluminiu (Kanthal A, Kanthal DSD, fecral, cromel aliaj nr. 1, 2, 3).

Aliaje pe bază de nichel și crom. În aliajele pe bază de nichel și crom (nicrom, cromnichel) conținutul maxim admisibil de crom este de 30%. La un conținut mai mare în crom, odată cu creșterea rezistenței la căldură crește foarte mult duritatea aliajului, ceea ce face ca prelucrarea lui să devină dificilă.

Creșterea rezistenței la căldură a aliajului nicrom cu creșterea conținutului de crom se explică prin aceea că viteza de oxidare a aliajului este mult redusă, deoarece pelicula protectoare de strat de oxid de crom care se formează pe suprafața sîrmei de rezistență, are o densitate, o compactitate și o rezistență mecanică ridicată, îngreunînd difuziunea oxigenului în aliaj, datorită îmbogățirii acestei pelicule de suprafață cu oxizi de crom. Acest strat, avînd însă un coeficient de dilatare diferit în raport cu materialul de bază, trebuie ferit de variațiile bruște de tempera-

Tabelul 3.1

Caracteristicile fizico-mecanice ale aliajelor pe bază de nichel-crom

Aliajul	Compoziția	Densitatea kg/dm³	Temperatura de topire °C	Temperatura de lucru °C	Rezistența de rupere la tracțiune la 20°C kgf/mm²	Rezistivitatea Ω mm²/m	Coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura 1/°C	Domeniul de utilizare
Nicrom Crom-nichel	19—21 % Cr 81—79 % Ni	8,4	1 390— 1 420	1 150	92	1,1—1,2	0,00035	Cuptoare industriale cu rezistență, dispozitive de încălzire pentru laboratoare și locuințe

tură care favorizează formarea de crăpături și implicit oxidarea în continuare a aliajului.

Aliajul pe bază de nichel și crom cel mai întrebuințat în construcția rezistențelor electrice este cromnichel H 20N 80 cu un conținut de 20% Cr și 80% Ni, cu o greutate specifică de 8,4 kg/dm^3, temperatura de topire de 1 400°C, coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura $0{,}35 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, rezistivitatea 1,1—1,2 Ω mm^2/m și temperatura de lucru de 1 150°C. Compoziția și caracteristicile acestor aliaje sînt date în tabelul 3.1, iar datele sîrmelor rezistive de tip Nikrothal 80 necesare în calculele de dimensionare sînt date în tabelul 3.2 unde C_t reprezintă coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura.

În aliajul de crom-nichel se introduce, în general, mangan în proporție de 1—2% cu rol de dezoxidant, pentru ușurarea operațiilor de prelucrare prin forjare și laminare.

Aliaje pe bază de fier, nichel și crom (feronicrom). Prin înlocuirea parțială în aliajele crom-nichel a nichelului cu fierul în proporție de 25—50% se obține feronicromul, un aliaj cu caracteristici mecanice și de prelucrare îmbunătățite la temperaturi ridicate și cu un preț de cost mai redus. Datorită însă fierului, la acestea, în comparație cu aliajele nicrom la temperaturi de peste 900°C, rezistența la oxidare este mai mică. Caracteristicile fizico-mecanice ale aliajelor pe bază de fier, nichel și crom sînt date în tabelul 3.3. iar cele pentru sîrmele de rezistențe de tip Nikrothal 60, 40, 20, în tabelele 3.4, 3.5 și 3.6.

Conținutul de crom al aliajelor feronicrom este de 15—20%, al nichelului de 60—70%, iar al manganului introdus cu dezoxidant, de 1—2%.

Datorită proprietăților mecanice îmbunătățite ale acestui aliaj, sîrmele pentru rezistențe sînt executate cu diametre de pînă la 204,2 cm^2/m (v. tabelele 3.2—3.6).

Caracteristicile tehnice ale sîrmelor din aliaj Nikrothal 60

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
C_t	1,000	1,009	1,018	1,028	1,037	1,047	1,042	1,036	1,037	1,042	1,049	1,059	1,069
Ø mm	Ω/m 20°C		cm²/m		m/kg		g/m		Ω/kg		cm²/Ω 20°C		
6,50	0,03285		204,2		3,631		275,4		0,1193		6 217		
6,00	0,03855		188,5		4,261		234,7		0,1643		4 890		
5,50	0,04588		172,8		5,071		197,2		0,2327		3 766		
5,00	0,05551		157,1		6,136		163,0		0,3406		2 830		
4,75	0,06151		149,2		6,799		147,1		0,4182		2 426		
4,50	0,06853		141,4		7,575		132,0		0,5192		2 063		
4,25	0,07683		133,5		8,493		117,7		0,6525		1 738		
4,00	0,08674		125,7		9,588		104,3		0,8316		1 449		
3,75	0,09869		117,8		10,91		91,67		1,077		1 194		
3,50	0,1133		110,0		12,52		79,86		1,419		970,6		
3,25	0,1314		102,1		14,52		68,86		1,908		777,1		
3,00	0,1542		94,25		17,04		58,67		2,628		611,2		
2,80	0,1770		87,96		19,57		51,11		3,464		496,9		
2,60	0,2053		81,68		22,69		44,07		4,659		397,9		
2,50	0,2221		78.54		24,54		40,74		5,450		353,7		
2,40	0,2409		75,40		26,63		37,55		6,417		312,9		
2,30	0,2623		72,26		29,00		34,48		7,608		275,4		
2,20	0,2867		69,12		31,69		31,55		9,088		241,0		
2,10	0,3147		65,97		34,79		28,75		10,95		209,6		
2,00	0,3470		62,83		38,35		26,08		13,31		181,1		
1,90	0,3844		59,69		42,49		23,53		16,34		155,3		
1,80	0,4283		56,55		47,35		21,12		20,28		132,0		
1,70	0,4802		53,41		53,08		18,84		25,49		111,2		
1,60	0,5421		50,27		59,92		16,69		32,49		92,72		
1,50	0,6168		47,12		68,18		14,67		42,05		76,40		
1,40	0,7081		43,98		78,27		12,78		55,42		62,12		
1,30	0,8212		40,84		90,77		11,02		74,73		49,73		
1,25	0,8882		39,27		98,18		10,19		87,20		44,21		
1,20	0,9638		37,70		106,5		9,387		102,7		39.12		
1,15	1,049		36,13		116,0		8,621		121,7		34,43		

Tabelul 3.2 (continuare)

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
C_t	1,000	1,009	1,018	1,028	1,037	1,047	1,042	1,036	1,037	1,042	1,040	1,050	1,030

Ø mm	Ω/m 20°C	cm³/m	m/kg	g/m	Ω/kg	cm²/Ω 20°C
1,10	1,147	34,56	126,8	7,888	145,4	30,13
1,05	1,259	32,99	139,1	7,187	175.1	26,20
1,00	1,388	31,42	153,4	6,519	212,9	22,64
0,95	1,538	29,85	170,0	5,883	261,4	19,41
0,90	1,713	28,27	189,4	5,280	324,5	16,50
0,85	1,921	26,70	212,3	4,710	407,8	13,90
0,80	2,168	25,13	239,7	4,172	519,8	11,59
0,75	2,467	23,56	272,7	3,667	672,8	9,550
0,70	2,832	21,99	313,1	3,194	886,7	7,764
0,65	3,285	20,42	363,1	2,754	1 193	6,217
0,60	3,855	18,85	426,1	2,347	1 643	4,890
0,55	4,588	17,28	507,1	1,972	2 326	3,766
0,50	5,551	15,71	613,6	1,630	3 406	2,830
0,45	6,853	14,14	757,5	1,320	5 192	2,063
0,40	8,674	12,57	958,8	1,043	8 316	1,449
0,35	11,33	11,00	1 252	0,7986	14 190	0,9706
0,30	15,42	9,425	1 704	0,5867	26 280	0,6112
0,25	22,21	7,854	2 454	0,4074	54 500	0,3537
0,20	34,70	6,283	3 835	0,2608	133 100	0,1811
0,19	38,44	5,969	4 249	0,2353	163 400	0,1553
0,18	42,83	5,655	4 735	0,2112	202 800	0,1320
0,17	48,02	5,341	5 308	0,1884	254 900	0,1112
0,16	54,21	5,027	5 992	0,1669	324 900	0,09272
0,15	61,68	4,712	6 818	0,1467	420 500	0,07640
0,14	70,81	4,398	7 827	0,1278	554 200	0,06212
0,13	82,12	4,084	9 077	0,1102	745 400	0,04973
0,12	96,38	3,770	10 650	0,09387	1 027 000	0,03912
0,11	114,7	3,456	12 680	0,07888	1 454 000	0,03013
0,10	138,8	3,142	15 340	0,06519	2 129 000	0,02264
0,09	171,3	2 827	18 940	0,05280	3 245 000	0,01650
0,08	216,8	2,513	23 970	0,04172	5 198 000	0,01159
0,07	283,2	2,199	31 310	0,03194	8 867 000	0,007764
0,06	385,5	1,885	42 610	0,02347	16 430 000	0,004890
0,05	555,1	1,571	61 360	0,01630	34 060 000	0,002830

Tabelul 3.2

Caracteristicile fizico-mecanice ale aliajelor pe bază de fier, nichel, crom și ale aliajelor pe bază de fier, crom și aluminiu

Aliajul	Compoziția	Densitatea	Temperatura		Rezistența de rupere la tracțiune la 20°C kgf/mm²	Rezistivitatea Ω mm²/m	Coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura 1/°C	Domeniul de utilizare
			de topire °C	de lucru °C				
Feronicrom	15—20% Cr 60—62% Ni 25—18% Fe	8,1—8,2	1 380—1 420	1 050	70	1,0—1,15	0,00013	Reostate, elemente încălzire pentru sobe, termostate, casnice
Fecral Megapir	12% Cr 2% Al rest Fe	7,6	1 450	850	70	1,2—1,4	0,00018	Idem
Aliaj nr. 1	25% 5% rest Fe	6,8—7,2	1 450—1 500	1 000—1 150	60—70	1,2—1,4	0,00005	
Aliaj nr. 2	16% Cr 5% Al rest Fe	7—72	1 450—1 500	1 250	65—80	1,3—1,6	0,00005	
Aliaj nr. 3	45% Cr 10% Al rest Fe	6,9	1 560	1 350	90	1,9		
Cromel Crom-aluminiu	30% Cr 4% Al rest Fe	7,1	1 500	1 250—1 300	80	1,35	0,00004	Sîrme de secțiune mare pentru cuptoare electrice industriale

Tabelul 3.4

Caracteristicile tehnice ale sîrmelor din aliajul Nikrothal 60

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 123
C_t	1,000	1,016	1,035	1,050	1,065	1,080	1 088	1,094	1,009	1 105	1,111	1,121	1,124
Ø mm		Ω/m 20°C		cm²/m		m/kg		g/m		Ω/kg		cm²/Ω 20°C	
6,50		0,03345		204,2		3,675		272,1		0,1229		6 105	
6,00		0,03926		188,5		4,313		231,9		0,1693		4 801	
5,50		0,04672		172,8		5,133		194,8		0,2398		3 698	
5,00		0,05653		157,1		6,211		161,0		0,3511		2 779	
4,75		0,06264		149,2		6,882		145,3		0,4311		2 382	
4,50		0,06979		141,4		7,668		130,4		0,5352		2 026	
4,25		0,07824		133,5		8,596		116,3		0,6726		1 706	
4,00		0,08833		125,7		9,705		103,0		0,8572		1 423	
3,75		0,1005		117,8		11,04		90,57		1,110		1 172	
3,50		0,1154		110,0		12,68		78,89		1,462		953,1	
3,25		0,1338		102,1		14,70		68,03		1,967		763,1	
3,00		0,1570		94,25		17,25		57,96		2,709		600,2	
2,80		0,1803		87,96		19,81		50,40		3,570		488,0	
2,60		0,2091		81,68		22,97		43,54		4,802		390,7	
2,50		0,2261		78,54		24,84		40,25		5,618		347,3	
2,40		0,2454		75,40		26,96		37,10		6,614		307,3	
2,30		0,2672		72,26		29,35		34,07		7,842		270,5	
2,20		0,2920		69,12		32,08		31,17		9,368		236,7	
2,10		0,3205		65,97		35,21		28,40		11,28		205,9	
2,00		0,3533		62,83		38,82		25,76		13,72		177,8	
1,90		0,3915		59,69		43,01		23,25		16,84		152,5	
1,80		0,4362		56,55		47,92		20,87		20,90		129,6	
1,70		0,4890		53,41		52,73		18,61		26,27		109,2	
1,60		0,5521		50,27		60,65		16,49		33,48		91,05	
1,50		0,6281		47,12		69,01		14,49		43,35		75,02	
1,40		0,7211		43,98		79,22		12,62		57,12		61,00	
1,30		0,8363		40,84		91,88		10,88		76,83		48,84	
1,25		0,9045		39,27		99,37		10,06		89,88		43,41	
1,20		0,9815		37,70		107,8		9,274		105,8		38,41	
1,15		1,069		36,13		117,4		8,517		125,5		33,81	
1,10		1,168		34,56		128,3		7,793		149,9		29,59	
1,05		1,282		32,99		140,8		7,100		180,5		25,74	
1,00		1,413		31,42		155,3		6,440		219,4		22,23	
0,95		1,566		29,85		172,0		5,812		269,4		19,06	
0,90		1,745		28,27		191,7		5,217		334,5		16,20	

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1125
C_t	1,000	1,016	1,038	1,050	1,065	1,080	1,088	1,094	1,090	1,105	1,111	1,121	1,124
Ø mm		Ω/m 20°C		cm²/m		m/kg		g/m		Ω/kg		cm³/Ω 10°C	
0,85		1,956		26,70		214,9		4,653		420,4		13'65	
0,80		2,208		25,13		242,6		4,122		535,8		11,38	
0,75		2,513		23,56		276,0		3,623		693,6		9,378	
0,70		2,884		21,99		316,9		3,156		914,0		7,625	
0,65		3,345		20,42		367,5		2,721		1 229		6,104	
0,60		3,926		18,85		431,3		2,319		1 693		4,801	
0,55		4,672		17,28		513,3		1,948		2 398		3,699	
0,50		5,653		15,71		621,1		1,610		3 511		2,779	
0,45		6,979		14,14		766,8		1,304		5 352		2,026	
0,40		8,833		12,57		970,5		1,030		8 572		1,423	
0,35		11,54		11,00		1 268		0,7889		14 620		0,9531	
0,30		15,70		9,425		1 725		0,5796		27 090		0,6002	
0,25		22,61		7,854		2 484		0,4025		56 180		0,3473	
0,20		35,33		6,283		3 882		0,2576		137 200		0,1778	
0,19		39,15		5,969		4 301		0,2325		168 400		0,1525	
0,18		43,62		5,655		4 792		0,2087		209 000		0,1296	
0,17		48,90		5,341		5 373		0,1861		262 700		0,1092	
0,16		55,21		5,027		6 065		0,1649		334 800		0,09105	
0,15		62,81		4,712		6 901		0,1449		433 500		0,07502	
0,14		72,11		4,398		7 922		0,1262		571 200		0,06100	
0,13		83,63		4,084		9 188		0,1088		768 300		0,04884	
0,12		98,15		3,770		10 780		0,09274		1 058 000		0,03841	
0,11		116,8		3,456		12 830		0,07793		1 499 000		0,02959	
0,10		141,3		3,142		15 530		0,06440		2 194 000		0,02223	
0,09		174,5		2,827		19 170		0,05217		3 345 000		0,01620	
0,08		220,8		2,513		24 260		0,04122		5 358 000		0,01138	
0,07		288,4		2,199		31 690		0,03156		9 140 000		0,007625	
0,06		392,6		1,885		43 130		0,02319		16 930 000		0,004801	
0,05		565,3		1,571		62 110		0,01610		35 110 000		0,002779	

Caracteristicile tehnice ale sirmelor din aliajul Nikrothal 40

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
C_t	1,000	1,031	1,064	1,095	1,125	1,152	1,173	1,192	1,210	1,224	1,235	1,244
Ø mm		Ω/m 20°C		cm²/m		m/kg		g/m		Ω/kg		cm²/Ω 20°C
6,50		0,03134		204,2		3,815		262,1		0,1196		6 516
6,00		0,03678		188,5		4,477		223,4		0,1647		5 125
5,50		0,04377		172,8		5,328		187,7		0,2332		3 947
5,00		0,05297		157,1		6,447		155,1		0,3415		2 966
4,75		0,05869		149,2		7,143		140,0		0,4192		2 543
4,50		0,06539		141,4		7,959		125,6		0,5204		2 162
4,25		0,07331		133,5		8,923		112,1		0,6541		1 821
4,00		0,08276		125,7		10,07		99,27		0,8337		1 518
3,75		0,09416		117,8		11,46		87,25		1,079		1 251
3,50		0,1081		110,0		13,16		76,01		1,422		1 017
3,25		0,1254		102,1		15,26		65,54		1,913		814,4
3,00		0,1471		94,25		17,91		55,84		2,635		640,6
2,80		0,1689		87,96		20,56		48,64		3,472		520,8
2,60		0,1959		81,68		23,84		41,94		4,670		417,0
2,50		0,2119		78,54		25,79		38,78		5,463		370,7
2,40		0,2299		75,40		27,98		35,74		6,433		328,0
2,30		0,2503		72,26		30,47		32,82		7,626		288,7
2,20		0,2736		69,12		33,30		30,03		9,110		252,6
2,10		0,3003		65,97		36,55		27,36		10,97		219,7
2,00		0,3310		62,83		40,29		24,82		13,34		189,8
1,90		0,3668		59,69		44,65		22,40		16,38		162,7
1,80		0,4087		56,55		49,74		20,10		20,33		138,4
1,70		0,4582		53,41		55,77		17,93		25,55		116,6
1,60		0,5173		50,27		62,06		15,88		32,56		97,18
1,50		0,5885		47,12		71,63		13,96		42,16		80,07
1,40		0,6756		43,98		82,23		12,16		55,55		65,10
1,30		0,7835		40,84		95,37		10,49		74,72		52,12
1,25		0,8475		39,27		103,1		9,695		87,42		46,34
1,20		0,9196		37,70		111,0		8,935		102,9		41,00
1,15		1,001		36,13		121,9		8,206		122,0		36,09

Temp. °C	20°C	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100
C_t	1,000	1,031	1,064	1,095	1,125	1,152	1,173	1,192	1,210	1,224	1,235	1,244
Ø mm		Ω 20°C		cm²/m		m/kg		g/m		Ω/kg		cm²/Ω 20°C
1,10		1,094		34,56		133,2		7,508		145,8		31,58
1,05		1,201		32,99		146,2		6,841		175,6		27,46
1,00		1,324		31,42		161,2		6,205		213,4		23,73
0,95		1,467		29,85		178,6		5,600		262,0		20,34
0,90		1,635		28,27		199,0		5,026		325,3		17,30
0,85		1,833		26,70		223,1		4,483		408,8		14,47
0,80		2,069		25,13		251,8		3,971		521,0		12,15
0,75		2,354		23,56		286,5		3,490		674,5		10,01
0,70		2,702		21,99		328,9		3,040		888,9		8,138
0,65		3,134		20,42		381,5		2 621		1 196		6,515
0,60		3,678		18,85		477,7		2,234		1 647		5,125
0,55		4,377		17,28		532,8		1,877		2 332		3,948
0,50		5,297		15,71		644,7		1,551		3 415		2,966
0,45		6,539		14,14		795,9		1,256		5 204		2,162
0,40		8,276		12,57		1 0007		0,9927		8 337		1,518
0,35		10,81		11,00		1 316		0,7601		14 220		1,017
0,30		14,71		9,425		1 791		0,5584		26 350		0,6406
0,25		21,19		7,854		2 579		0,3878		54 630		0,3707
0,20		33,10		6,283		4 029		0,2482		133 400		0,1808
0,19		36,68		5,969		4 465		0,2240		163 800		0,1627
0,18		40,87		5,655		4 974		0,2010		203 300		0,1384
0,17		45,82		5,341		5 577		0,1793		255 500		0,1166
0,16		51,73		5,027		6 296		0,1588		325 600		0,09718
0,15		58,85		4,712		7 163		0,1396		421 600		0,08007
0,14		67,56		4,398		8 223		0,1216		555 500		0,06510
0,13		78,35		4,084		9 537		0,1049		747 200		0,05212
0,12		91,96		3,770		11 190		0,08935		1 029 000		0,04100
0,11		109,4		3,456		13 320		0,07508		1 458 000		0,03158
0,10		132,4		3,142		16 120		0,06205		2 134 000		0,02373
0,09		163,5		2,827		19 900		0,05026		3 253 000		0,01730
0,08		206,9		2,513		25 180		0,03971		5 210 000		0,01215
0,07		270,2		2,199		32 890		0,03040		8 889 000		0,008138
0,06		367,8		1,885		44 770		0,02234		16 470 000		0,005125
0,05		529,7		1,571		64 470		0,01551		34 150 000		0,002966

Caracteristicile tehnice ale sirmelor din aliajul Nikrothal 20

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 050
C_t	1,000	1,040	1,095	1,135	1,169	1,207	1,230	1,263	1,284	1,305	1,325	1335
Ø mm	Ω/m 20°C			cm²/m		m/kg		g/m		Ω/kg		20°C
6,50	0,02863			204,2		3,864		258,8		0,1106		7 133
6,00	0,03360			188,5		4,534		220,5		0,1523		5 610
5,50	0,03999			172,8		5,396		185,3		0,2158		4 321
5,00	0,04838			157,1		6,529		153,2		0,3159		3 247
4,75	0,05361			149,2		7,235		138,2		0,3879		2 784
4,50	0,05973			141,4		8,061		124,1		0,4815		2 367
4,25	0,06697			133,5		9,037		110,7		0,6052		1 994
4,00	0,07560			125,7		10,20		98,02		0,7713		1 662
3,75	0,08601			117,8		11,61		86,15		0,9984		1 370
3,50	0,09874			110,0		13,33		75,04		1,316		1 114
3,25	0,1145			102,1		15,45		64,71		1,770		891,6
3,00	0,1344			94,25		18,14		55,14		2,438		701,3
2,80	0,1543			87,96		20,82		48,03		3,212		570,2
2,60	0,1789			81,68		24,15		41,41		4,321		456,5
2,50	0,1935			78,54		26,12		38,29		5,055		405,8
2,40	0,2100			75,40		28,34		35,29		5,951		359,0
2,30	0,2287			72,26		30,86		32,41		7,056		316,0
2,20	0,2499			69,12		33,73		29,65		8,429		276,6
2,10	0,2743			65,97		37,01		27,02		10,15		240,5
2,00	0,3024			62,83		40,81		24,50		12,34		207,8
1,90	0,3351			59,69		45,22		22,12		15,15		178,1
1,80	0,3733			56,55		50,38		19,85		18,81		151,5
1,70	0,4185			53,41		56,48		17,70		23,64		127,6
1,60	0,4725			50,27		63,76		15,68		30,13		106,4
1,50	0,5376			47,12		72,55		13,78		39,00		87,66
1,40	0,6171			43,98		83,28		12,01		51,40		71,27
1,30	0,7157			40,84		96,59		10,35		69,13		57,06
1,25	0,7741			39,27		104,5		9,572		80,87		50,72
1,20	0,8400			37,70		113,4		8,822		95,22		44,88
1,15	0,9146			36,13		123,4		8,102		112,9		39,50

Tabelul 3.6 (continuare)

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 050
C_t	1,000	1,040	1,095	1,135	1,169	1,207	1,230	1,263	1,284	1,305	1,325	1,335
Ø mm		Ω/m 20°C		cm²/m		m/kg		g/m		Ω/kg		cm²/Ω 20°C
1,10		0,9996		34,56		134,9		7,413		134,9		34,57
1,05		1,097		32,99		148,1		6,754		162,4		30,07
1,00		1,210		31,42		163,2		6,126		197,4		25,97
0,95		1,340		29,85		180,9		5,529		242,4		22,68
0,90		1,493		28,27		201,5		4,962		300,9		18,93
0,85		1,674		26,70		225,9		4,426		378,2		15,95
0,80		1,890		25,13		255,1		3,921		482,0		13,30
0,75		2,150		23,56		290,2		3,446		624,0		9,573
0,70		2,469		21,99		333,1		3,002		822,3		8,909
0,65		2,863		20,42		386,4		2,588		1 106		7,133
0,60		3,360		18,85		453,4		2,205		1 523		5,610
0,55		3,999		17,28		539,6		1,853		2 158		4,321
0,50		4,838		15,71		652,9		1,532		3 159		3,247
0,45		5,973		14,14		806,1		1,241		4 815		2,367
0,40		7,560		12,57		1 020		0,9802		7 713		1,662
0,35		9,874		11,00		1 333		0,7504		13 160		1,114
0,30		13,44		9,425		1 814		0,5514		24 380		0,7013
0,25		19,35		7,854		2 612		0,3829		50 550		0,4058
0,20		30,24		6,283		4 081		0,2450		123 400		0,2078
0,19		33,51		5,969		4 522		0,2212		151 500		0,1781
0,18		37,33		5,655		5 038		0,1985		188 100		0,1515
0,17		41,85		5,341		5 648		0,1770		236 400		0,1276
0,16		47,25		5,027		6 376		0,1568		301 300		0,1064
0,15		53,76		4,712		7 255		0,1378		390 000		0,08766
0,14		61,71		4,398		8 328		0,1201		451 000		0,07127
0,13		71,57		4,084		9 659		0,1035		691 300		0,05706
0,12		84,00		3,770		11 340		0,08822		952 200		0,04488
0,11		99,96		3,456		13 490		0,07413		1 349 000		0,03457
0,10		121,0		3,142		16 320		0,06126		1 974 000		0,02597

Tabelul 3.7

Caracteristicile fizico-mecanice ale aliajelor Kanthal A și Kanthal DSD

Aliajul	Kanthal A	Kanthal DSD
Temperatura maximă de utilizare în regim permanent, în °C	1 330	1 280
Compoziția chimică, în %		
Cr	22	22
Al	5,0	4,5
Co	0,5	0,5
Fe	rest	rest
Densitatea specifică, în g/cm^3	7,15	7,25
Rezistivitatea la 20°C, în $\Omega mm^2/m$	1,39	1,35
Coeficientul de dilatare liniară, în $cm \cdot cm^{-1} \cdot °C^{-1}$		
de la 20 la 250°C	$11,0 \cdot 10^{-6}$	
de la 20 la 500°C	$12,5 \cdot 10^{-6}$	
de la 20 la 750°C	$14,0 \cdot 10^{-6}$	
de la 20 la 1 000°C	$15,0 \cdot 10^{-6}$	
Conductivitatea termică la 20°C, în $cal \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot °C^{-1}$	0,04	
Căldura specifică la 20°C, în $cal \cdot g^{-1} \cdot °C^{-1}$	0,11	
Temperatura de topire, în °C	1 510	
Rezistența de rupere, în $kgf \cdot mm^{-2}$	de la 65 la 85	
Limita de curgere, în $kgf \cdot mm^{-2}$	de la 45 la 65	
Duritatea, în $kgf \cdot mm^{-2}$	de la 200 la 260	
Alungire la rupere pe 200 mm lungime de măsurare, în %	de la 12 la 20	

Aliaje pe bază de fier, crom și aluminiu. Deoarece nichelul din materialele rezistive are un preț ridicat, s-au elaborat aliaje rezistive conținînd fier, crom și aluminiu. La acestea conținutul de crom este de 15—25% (maximum 45%), cel de aluminiu de 4—10%, iar restul fier. Cromul și aluminiul constituie elementele de aliere de bază pentru sporirea rezistenței electrice și pentru reducerea coeficientului de variație a rezistenței cu temperatura, iar oxizii lor dau aliajului o mare rezistență la oxidare, făcîndu-l utilizabil la temperaturi înalte.

Caracteristicile tehnice ale sîrmelor din aliajul Kanthal A

20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 330
,000	1,002	1,006	1,011	1,017	1,027	1,036	1,043	1,049	1,053	1,056	1,058	1,060	1,062	1,063

Ø mm	Ω/m 20°C	cm²/m	m/kg	g/m	Ω/kg	cm²/Ω 20°C
6,50	0,04189	204,2	4,215	237,3	0,1766	4 875
6,00	0,04916	188,5	4,947	202,2	0,2432	3 834
5,50	0,05851	172,8	5,887	169,9	0,3444	2 953
5,00	0,07079	157,1	7,123	140,4	0,5043	2 219
4,75	0,07844	149,2	7,892	126,7	0,6191	1 903
4,50	0,08740	141,4	8,794	113,7	0,7686	1 618
4,25	0,09798	133,5	9,859	101,4	0,9660	1 363
4,00	0,1106	125,7	11,13	89,85	1,231	1 136
3,75	0,1259	117,8	12,66	78,97	1,594	936,1
3,50	0,1445	110,0	14,54	68,79	2,100	761,1
3,25	0,1676	102,1	16,86	59,32	2,825	609,4
3,00	0,1966	94,25	19,79	50,54	3,891	479,3
2,80	0,2257	87,97	22,71	44,03	5,128	389,7
2,60	0,2618	81,68	26,34	37,96	6,896	312,0
2,50	0,2832	78,54	28,49	35,10	8,068	277,4
2,40	0,3073	75,40	30,92	32,35	9,499	245,4
2,30	0,3348	72,26	33,66	29,71	11,26	216,0
2,20	0,3657	69,12	36,79	27,18	13,45	189,0
2,10	0,4013	65,97	40,38	24,77	16,21	164,4
2,00	0,4425	62,83	44,52	22,46	19,70	142,0
1,90	0,4902	59,69	49,33	20,27	24,18	121,8
1,80	0,5462	56,55	54,96	18,20	30,02	103,5
1,70	0,6124	53,41	61,62	16,23	37,73	87,21
1,60	0,6913	50,27	69,56	14,38	48,09	72,71
1,50	0,7866	47,12	79,14	12,64	62,25	59,91
1,40	0,9030	43,98	90,85	11,01	82,04	48,71
1,30	1,047	40,84	105,4	9,490	110,3	39,00
1,25	1,133	39,27	114,0	8,775	129,1	34,67
1,20	1,229	37,70	123,7	8,087	152,0	30,68
1,15	1,338	36,13	134,7	7,427	180,2	27,00

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1330
C_t	1,000	1,002	1,006	1,011	1,017	1,027	1,036	1,043	1,049	1,053	1,056	1,058	1,200	1,002	1,003

Ø mm	Ω/m 20°C	cm²/m	m/kg	g/m	Ω/kg	cm²Ω 20°C
1,10	1,463	34,56	147,2	6,795	215,3	23,63
1,05	1,605	32,99	161,5	6,191	259,3	20,55
1,00	1,770	31,42	178,1	5 616	315,2	17,75
0,95	1,961	29,85	197,3	5,068	386,9	15,22
0,90	2,185	28,27	219,9	4,549	480,4	12,94
0,85	2,450	26,70	246,5	4,057	603,8	10,90
0,80	2,765	25,13	278,2	3,594	769,4	9,089
0,75	3,146	23,56	316,6	3,159	996,1	7,489
0,70	3,612	21,99	363,4	2,752	1 313	6,089
0,65	4,189	20,42	421,5	2,373	1 766	4,875
0,60	4,916	18,85	494,7	2,022	2 432	3,834
0,55	5,851	17,28	588,7	1,699	3 444	2,953
0,50	7,079	15,71	712,3	1,404	5 043	2,219
0,45	8 740	14,14	879,4	1,137	7 686	1,618
0,40	11,06	12,57	1 113	0,8985	12 310	1,136
0,35	14,45	11,00	1 454	0,6879	21 000	0,7611
0,30	19,66	9,425	1 979	0,5054	38 910	0,4793
0,25	28,32	7,854	2 849	0,3510	80 680	0,2774
0,20	44,25	6,283	4 452	0,2246	197 000	0,1420
0,19	49,02	5,969	4 933	0,2027	241 800	0,1218
0,18	54,62	5,655	5 496	0,1820	300 200	0,1035
0,17	61,24	5,341	6 162	0,1623	377 300	0,08721
0,16	69,13	5,027	6 956	0,1438	480 900	0,07271
0,15	78,66	4,712	7 914	0,1264	622 500	0,05991
0,14	90,30	4,398	9 085	0,1101	820 400	0,04871
0,13	104,7	4,084	10 540	0,09490	1 103 000	0,03900
0,12	122,9	3,770	12 370	0,08087	1 520 000	0,03068
0,11	146,3	3,456	14 720	0,06795	2 153 000	0,02363
0,10	177,0	3,142	17 810	0,05616	3 152 000	0,01775
0,09	218,5	2,827	21 990	0,04549	4 804 000	0,01294
0,08	276,5	2,513	27 820	0,03594	7 694 000	0,009089
0,07	361,2	2,199	36 340	0,02752	13 130 000	0,006089
0,06	491,6	1,885	49 470	0,02022	24 320 000	0,003834
0,05	707,9	1,571	71 230	0,01404	50 430 000	0,002219

Caracteristicile tehnice ale sîrmelor din aliajul Kanthal DSD

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 280
C_t	1,000	1,002	1,007	1,012	1,019	1,032	1,045	1,055	1,061	1,066	1,068	1,072	1,075	1,078

Ø mm	Ω/m 20°C	cm²/m	m/kg	g/m	Ω/kg	cm²/Ω 20°C
6,50	0,04068	204,2	4,157	240,6	0,1691	5 019
6,00	0,04775	188,5	4,878	205,0	0,2329	3 948
5,50	0,05682	172,8	5,806	172,3	0,3299	3 041
5,00	0,06876	157,1	7,025	142,4	0,4830	2 285
4,75	0,07618	149,2	7,784	128,5	0,5930	1 959
4,50	0,08488	141,4	8,673	115,3	0,7362	1 665
4,25	0,09516	133,5	9,723	102,9	0,9253	1 403
4,00	0,1074	125,7	10,98	91,10	1,179	1 170
3,75	0,1222	117,8	12,49	80,08	1,526	963,8
3,50	0,1403	110,0	14,34	69,75	2,012	783,6
3,25	0,1627	102,1	16,63	60,15	2,706	627,4
3,00	0,1910	94,25	19,51	51,25	3,727	495,3
2,80	0,2192	87,97	22,40	44,64	4,911	401,2
2,60	0,2543	81,68	25,98	38,49	6,606	321,2
2,50	0,2750	78,54	28,10	35,59	7,728	285,6
2,40	0,2984	75,40	30,49	32,80	9,099	252,7
2,30	0,3249	72,26	33,20	30,12	10,79	222,4
2,20	0,3551	69,12	36,29	27,56	12,89	194,6
2,10	0,3898	65,97	39,82	25,11	15,52	169,3
2,00	0,4297	62,83	43,91	22,78	18,87	146,2
1,90	0,4761	59,69	48,65	20,56	23,16	125,4
1,80	0,5305	56,55	54,20	18,45	28,76	106,6
1,70	0,5948	53,41	60,77	16,46	36,14	89,79
1,60	0,6714	50,27	68,60	14,58	46,06	74,86
1,50	0,7639	47,12	78,05	12,81	59,63	61,69
1,40	0,8770	43,98	89,60	11,16	78,58	50,15
1,30	1,017	40,84	103,9	9,623	105,7	40.15
1,25	1,100	39,27	112,4	8,897	123,6	35,70
1,20	1,194	37,70	122,0	8,200	145,6	31,58
1,15	1,300	36,13	132,8	7,531	172,6	27,80

Tabelul 3.9 (continuare)

Temp. °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 280
C_t	1 000	1 002	1 007	1 012	1 019	1 032	1 045	1 055	1 061	1 060	1 068	1 072	1 075	1 078

Ø mm	Ω/m 20°C	cm²/m	m/kg	g/m	Ω/kg	cm²/Ω 20°C
1,10	1,421	34,56	145,1	6,890	206,2	24,33
1,05	1,559	32,99	159,3	6,278	248,4	21,16
1,00	1,719	31,42	175,6	5,694	301,9	18,28
0,95	1,905	29,85	194,6	5,139	370,6	15,67
0,90	2,122	28,27	216,8	4,612	460,1	13,32
0,85	2,379	26,70	243,1	4,114	578,3	11,22
0,80	2,686	25,13	274,4	3,644	737,0	9,358
0,75	3,056	23,56	312,2	3,203	954,1	7,711
0,70	3,508	21,99	358,4	2,790	1 257	6,269
0,65	4,068	20,42	415,7	2,406	1 691	5 019
0,60	4,775	18,85	487,8	2,050	2 329	3,948
0,55	5,682	17,28	580,6	1,723	3 299	3,041
0,50	6,876	15,71	702,5	1,424	4 830	2,285
0,45	8,488	14,14	867,3	1,153	7 362	1,665
0,40	10,74	12,57	1 098	0,9110	11 790	1,170
0,35	14,03	11,00	1 434	0,6975	20 120	0,7836
0,30	19,10	9,425	1 951	0,5125	37 270	0,4935
0,25	27,50	7,854	2 810	0,3559	77 280	0,2856
0,20	42,97	6,283	4 301	0,2278	188 700	0,1462
0,19	47,61	5,969	4 865	0,2056	231 600	0,1254
0,18	53,05	5,655	5 420	0,1845	287 600	0,1066
0,17	59,48	5,341	6 077	0,1646	361 400	0,08979
0,16	67,14	5,027	6 860	0,1458	460 600	0,07486
0,15	76,39	4,712	7 805	0,1281	596 300	0,06169
0,14	87,70	4,398	8 960	0,1116	785 800	0,05015
0,13	101,7	4,084	10 390	0,09623	1 057 000	0,04015
0,12	119,4	3,770	12 200	0,08200	1 456 000	0,03158
0,11	142,1	3,456	14 510	0,06890	2 062 000	0,02433
0,10	171,9	3,142	17 560	0,05694	3 019 000	0,01828
0,09	212,2	2,827	21 680	0,04612	4 601 000	0,01332
0,08	268,6	2,513	27 440	0,03644	7 370 000	0,009358
0,07	350,8	2,199	35 840	0,02790	12 570 000	0,006269
0,06	477,5	1,885	48 780	0,02050	23 290 000	0,003948
0,05	687,6	1,571	70 250	0,01424	48 300 000	0,002285

Caracteristicele aliajelor pe bază de fier, crom și aluminiu (fecral, aliaj nr. 1, 2, 3 cromel) sînt date în tabelul 3.3.

Aliajul pe bază de fier, crom, aluminiu cu un adaos de cobalt cu cea mai largă întrebuințare în țara noastră este Kanthalul de două tipuri: Kanthal A și Kanthal DSD. Aceste aliaje sînt foarte rezistente la temperaturi înalte de funcționare, datorită oxidului de aluminiu care reduce oxidarea acestora și respectiv conduce la utilizarea lor la temperaturi mai mari decît ale celorlalte aliaje.

Compoziția chimică și caracteristicile fizico-mecanice ale sîrmelor Kanthal A și Kanthal DSD sînt date în tabelele 3.7, 3.8 și 3.9.

Se va observa că temperatura maximă admisă, trecută în tabelul 3.7 pentru sîrmele Kanthal diferă față de cea a aliajelor cu compoziții similare trecute în diferite documentații. Acest lucru se explică prin faptul că încă nu există norme certe stabilite care să definească noțiunea de temperatură maximă admisă. Această noțiune este în strînsă legătură nu numai cu dimensiunile sîrmei, ci depinde și de modul de folosire în diferite medii de funcționare.

În tabelul 3.10 se dau temperaturile maxime admise pentru diferite diametre ale sîrmei Kanthal A și Kanthal DSD.

Tabelul 3.10

Temperaturile maxime admise pentru diferite diametre ale sîrmelor Kanthal A și Kanthal DSD

Calitatea sîrmei	Dimensiunile, în mm			
	0,15—0,40	0,41—0,95	1÷3	>3
Kanthal A	925—1 050	1 050—1 175	1 175—1 300	1 330
Kanthal DSD	925—1 025	1 025—1 100	1 100—1 200	1 280

3.2. Materiale izolante pentru elemente încălzitoare

Spirala de încălzire a elementului încălzitor electric în tub trebuie să fie izolată față de tub printr-un material izolant care să-i permită o funcționare sigură, fără pericol de electrocutare a personalului de deservire și în același timp să satisfacă următoarele condiții:

— să aibă rezistivitate cît mai ridicată la temperaturi care ating în unele cazuri 1 100°C;

— să posede o conductivitate termică cît mai ridicată în vederea asigurării unei transmiteri de căldură cît mai bune de la spirala de încălzire la mediul înconjurător;

— să nu corodeze spirala de încălzire sau materialul tubului, atît în cazul temperaturilor înalte de lucru cît și la temperatura de depozitare sau staționare;

— să fie cît mai puțin higroscopic;

— să nu fie dăunător muncitorilor în procesul de fabricație;

— să permită aplicarea unei tehnologii cît mai productive în condiții de calitate garantată. În acest scop granulația și repartiția granulelor trebuie să fie astfel aleasă încît să asigure o curgere a prafului uniformă pe toată lungimea tubului și în spirala din interiorul lui. De granulația și repartiția granulelor, precum și de capacitatea de curgere uniformă în procesul de umplere a tubului depinde și compactitatea materialului izolant, precum și uniformitatea ei pe toată lungimea tubului.

Materiile prime folosite care pot fi luate în considerare sub aspectele de mai sus sînt oxizii magneziului, aluminiului, siliciului, zirconului și ai beriliului. Ultimii doi sînt utilizați mai puțin, din cauza prețului de cost ridicat.

În prezent, ca material izolant la fabricația elementelor încălzitoare electrice în tub se folosește cu prioritate oxidul de magneziu (magnezie) datorită proprietăților sale excepționale, fiind un produs sintetic care se caracterizează printr-un grad înalt de puritate. Ca materie brută în fabricația lui se folosește carbonatul de magneziu (magnezit) care este mai întîi calcinat la temperatura de 1 400°C pentru a obține α MgO și apoi topit în cuptoare

cu arc electric la o temperatură de circa 2 700°C pentru a se obține β MgO (se găsește în natură ca periclas). După măcinarea la finețea adecvată, praful este din nou ars la temperatura de 1 150°C, după care poate fi utilizat în producție. Oxidul de magneziu poate fi utilizat și în stare nearsă la unele produse care nu reclamă o calitate superioară.

Caracteristicile oxidului de magneziu

Compoziția chimică. Rezistența de izolație a oxidului de magneziu este foarte mult influențată de impuritățile magneziei topite și anume de oxizii de metal și oxizii de alcalii. Acidul silicic și oxidul de calciu înrăutățesc mult proprietățile oxidului de magneziu, situație în care, pentru obținerea magnezitei topite, trebuie utilizată o materie primă complet pură. Conținutul înalt de sulf și carbon al magnezitei topite influențează mult durata de viață a elementelor încălzitoare electrice în tub, fapt pentru care conținutul în aceste elemente trebuie să fie cît mai redus.

Cantitatea maximă a impurităților conținute în magnezita topită de calitatea a I-a este: 2,5% SiO_2; 1,1% CaO; 0,14% Al_2O_3; 0,05% Fe_2O_3; 0,15% R_2O_3 și 0,01% Fe (magnetic).

Densitatea. Un indiciu care arată calitatea materialului izolant este densitatea prafului din tub după vibrare. În tubul umplut cu mașina de umplut tip Kanthal Oakley folosită în țara noastră la fabricarea în serie a elementelor încălzitoare electrice în tub, densitatea oxidului de magneziu de calitatea I-a este de 2,40—2,45 g/cm^3. Densitatea materialului nevibrat este de 2,0—2,1 g/cm^3.

După comprimare, densitatea prafului trebuie să crească la 3,05 pînă la 3,15 g/cm^3, pentru ca elementele încălzitoare electrice în tub să poată fi utilizate fără pericol la temperaturi înalte. O densitate de 3,0 g/cm^3 sau mai mică este insuficientă și adecvată doar pentru elementele încălzitoare electrice în tub funcționînd la temperaturi joase. Rezistența mecanică a materialului țevii limitează densitatea prafului care poate fi obținută prin comprimare. La elementele încălzitoare cu tubul dintr-un material moale, de exemplu cupru, aceasta nu poate fi comprimată la o densitate a prafului mai mare de 3,0 g/cm^3.

Granulozitatea. Modul de alcătuire a oxidului de magneziu din punct de vedere al proporţiilor (în procente de greutate), în care particulele de diferite mărimi compun materialul izolant are influenţă asupra densităţii, respectiv asupra conductivităţii termice a stratului izolant. Distribuţia granulelor în timpul executării elementelor încălzitoare electrice în tub trebuie să fie uniformă, în caz contrar apar diferenţe de alungiri la laminarea tubului. De acest lucru trebuie să se ţină seama la utilizarea prafului de oxid de magneziu, deoarece după transporturi lungi, datorită scuturării intense, poate apărea o separare după mărime a granulelor. În asemenea cazuri, trebuit ca înainte de utilizare materialul să fie bine amestecat, evitînd la această operaţie posibilitatea de absorbţie a umidităţii.

Granulozitatea prafului de magnezită topită utilizată la fabricaţia elementelor încălzitoare electrice în tub este dată în tabelul 3.11.

Practica a demonstrat că proporţia prafului care trece prin sita de 200 găuri (0,074 mm) are un rol hotărîtor pentru densitatea de umplere. La o creştere a acestei proporţii creşte densitatea de umplere, însă, în acelaşi timp, scade capacitatea de scurgere a prafului. Granulele mari trebuie să aibă dimensiuni maxime de 0,4 mm, dar să nu fie mai mici de 0,07 mm pentru a păstra o capacitate de curgere optimă.

Tabelul 3.11

Granulozitatea prafului de magnezită utilizată la fabricaţia E.I.T.-urilor

Numărul de găuri ale sitei	Dimensiunile granulelor, în mm	Procentul optim de praf care rămîne pe sită, în %
40	0,43	0
60	0,25	29
80	0,176	23
100	0,15	10
140	0,105	15
200	0,075	11
325	0,045	65
peste 325	peste 0,045	5,5

Variația granulozității și limitele ei admise (curbele *1* și *3*) în procesul de fabricație sînt arătate în fig. 3.1.

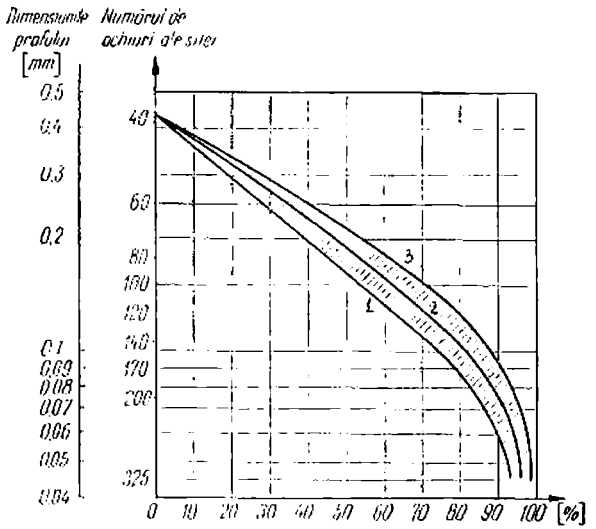


Fig. 3.1. Variația granulozității oxidului de magneziu.

Capacitatea de curgere a unui praf, în mod convențional, se definește ca timpul de curgere printr-un orificiu de diametru ϕ=4,3 mm a unei cantități de 100 g de praf dintr-un pahar (cupă). Pentru praful de oxid de magneziu acest timp este de circa 25 secunde. Practica a demonstrat că definiția capacității de curgere dată mai sus nu corespunde întocmai, datorită condițiilor specifice de curgere a prafului în țeava metalică pe mașina de umplut tuburi.

Rezistența de izolație a magnezitei are o importanță hotărîtoare asupra mărimii curenților de curgere ai elementelor încălzitoare electrice în tub; de asemenea, ea este importantă și pentru stabilirea stratului izolant în construcția elementelor încălzitoare electrice în tub.

Curbele din fig. 3.2 reprezintă rezultatul analizelor efectuate în laboratoarele firmei Bulten-Kanthal referitoare la rezistența de izolație a elementelor încălzitoare electrice în tub în funcție de încărcarea specifică și temperatura tubului, executată cu diferite calități de oxid de magneziu. Diferențele calitative sînt relativ reduse și rezultă din zona haşurată. Pentru comparație s-a trasat și curba pentru oxid de aluminiu de puritate maximă. La compararea celor două curbe se poate observa că rezistența de izolație este mult mai mică pentru elementele încălzitoare electrice în tub cu oxid de aluminiu în raport cu cele cu oxid de magneziu, ceea ce înseamnă că, în cazul folosirii oxidului de aluminiu, curenții de scurgere devin de peste 100 ori mai mari, rezultat confirmat prin practică. Experiențele au fost făcute în aer cu elemente încălzitoare electrice în tub încălzite cu propriile lor spirale de încălzire, obținîndu-se un gradient de temperatură în stratul izolant. S-au folosit pentru tub țevi din 25 Cr 20 Ni (v. fig. 3.2) și s-a încercat să se mențină cît mai constant toți factorii influenți ca spirală, grad de reducere etc.

Din cercetările de laborator, rezultă de asemenea că gradul de reducere are o influență foarte mică asupra rezistenței de izolație a materialului izolant și totodată faptul că există o tendință de scădere a acestuia la o reducere a diametrului de peste 16%, iar mărirea acestui grad sau a creșterii densității materialului izolant nu conduce la obținerea de curenți de scurgere mai mici. În afară de aceasta, diferența de rezistență apare numai la temperaturi exterioare ale țevii de la 700°C în sus. La temperaturi mai mici nu s-a constatat o diferență sensibilă și aceasta datorită faptului că în cazul curentului alternativ, la determinarea rezistenței electrice a izolației prin măsurarea curenților de scurgere, se măsoară nu numai impedanța dar și rezistența ohmică. În fig. 3.3 este dată variația impedanței și rezistenței ohmice a oxidului de magneziu în funcție de temperatură. Pentru a obține temperaturile impuse elementul încălzitor electric în tub a fost încălzit prin contact electric, prin legarea tubului la rețeaua de

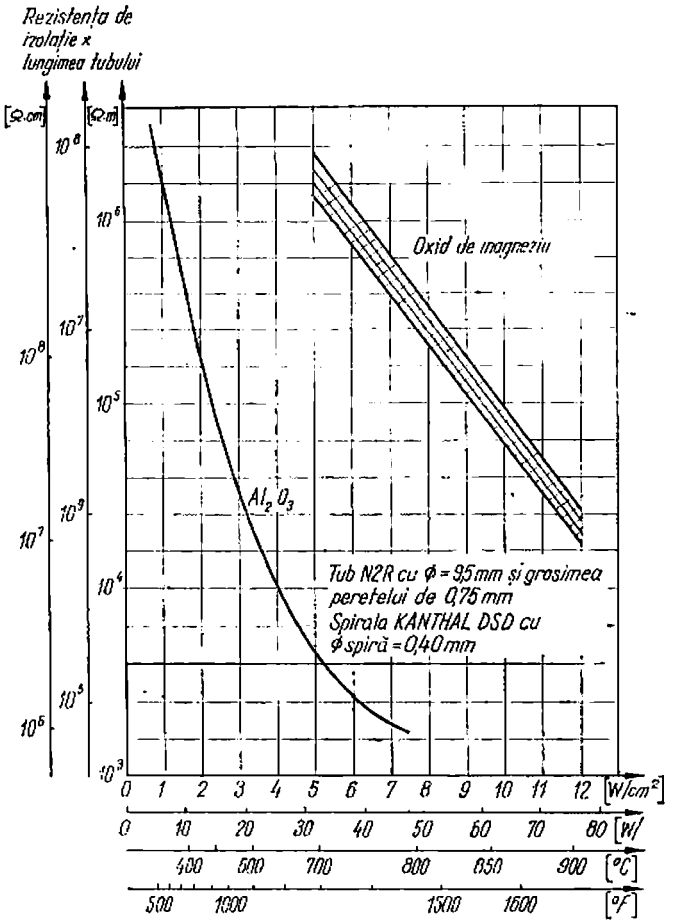


Fig. 3.2. Rezistența de izolație a unui element încălzitor în funcție de puterea specifică și temperatura tubului.

curent și menținută temperatura acestuia constantă pe toată secțiunea sa.

Din diagramă rezultă că rezistența la curent alternativ se apropie asimptotic la temperaturi mici către va-

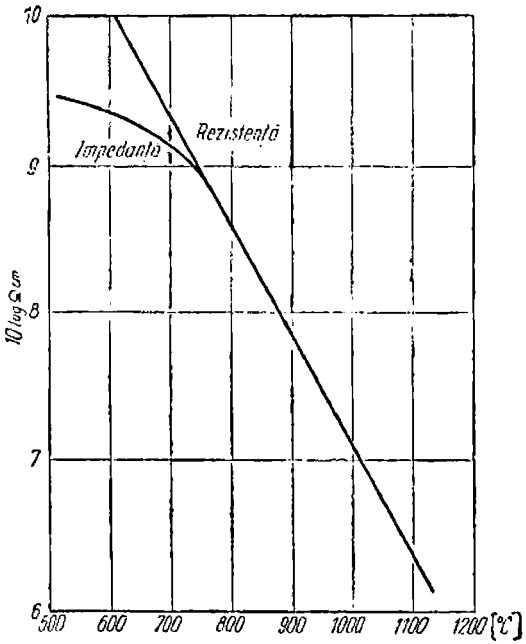


Fig. 3.3. Variația impedanței și rezistenței ohmice în funcție de temperatură.

loarea de $3{,}5 \times 10^9$ Ω/cm, ceea ce înseamnă că impedanța influențează mult rezultatele măsurării la temperaturi sub 700°C. La temperaturi mai înalte (între 700—800°C) factorul hotărîtor este însă rezistența ohmică, caz în care curba devine o dreaptă. Aceasta indică dependența rezistenței de izolație la temperaturi mai înalte de rezistența ohmică. Datorită acestei dependențe trebuie să se mențină cît mai mică temperatura medie în stratul izolant al elementului încălzitor, pentru a evita curenții de scurgere mari.

Conductivitatea termică a oxidului de magneziu. Conductivitatea termică a materialului izolant are influență hotărîtoare atît asupra temperaturii de lucru a materialului rezistiv, cît și asupra căderii de temperatură între spirala de încălzire și tub la o temperatură dată a acestuia din urmă. O conductivitate termică ridicată a materialului izolator determină o temperatură mai scăzută a spiralei de încălzire și ca urmare o temperatură medie mai mică a stratului izolant. O temperatură mai scăzută a sîrmei rezistive înseamnă o durată de viață mai mare a acesteia, iar o temperatură medie mai mică a stratului izolant are ca urmare un curent de scurgere mai scăzut, deci o siguranță mai mare în exploatare.

Conductivitatea oxidului de magneziu depinde de următorii factori:

— temperatura stratului de izolare;

— densitatea materialului în elementul încălzitor electric în tub, comprimat;

— granulația materialului izolant.

În fig. 3.4 este dată conductivitatea termică a magnezitei topite în elementul încălzitor electric în tub comprimat la o densitate de 3,05—3,15 g/cm^3 în funcție de temperatura medie a stratului de izolare. Pentru comparație s-au dat valorile conductivității termice a magnezitei topite compacte, precum și a elementului încălzitor umplut cu praf izolant, însă încă necomprimat cu o densitate a prafului de 2,4 g/cm^3. Suprafața hașurată reprezintă acea zonă în care trebuie să fie cuprinsă conductivitatea termică, iar linia plină din zona hașurată reprezintă valoarea medie a acesteia.

Valorile din cîmpul hașurat au fost determinate în laboratoarele firmei suedeze Kanthal și pe baza cataloagelor fabricilor producătoare de elemente încălzitoare electrice în tub.

Din analiza diagramei reiese că conductivitatea termică a magnezitei topite la densități ridicate depinde de temperatură și cu creșterea ei pînă la circa 700°C scade mult, după care se menține la valori relativ constante. Curba corespunde cu aceea a cristalului de oxid de magneziu omogen, la care conductivitatea termică scade de la

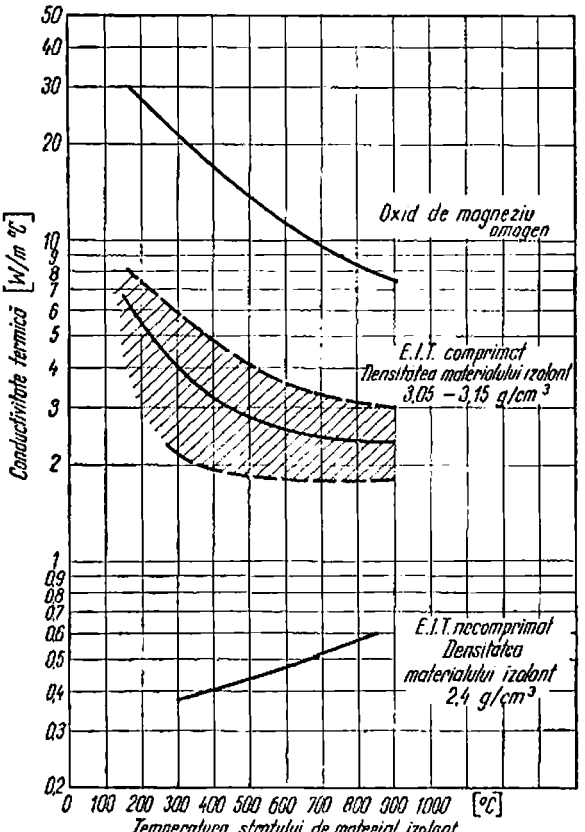


Fig. 3.4. Conductivitatea termică a oxidului de magneziu.

circa 35 W/m·°C la 7 W/m·°C cu creşterea temperaturii de la 100°C pînă la 1 000°C. Rezultă că pentru conductivitatea termică o importanţă deosebită o are densitatea prafului izolant, mai ales dacă se compară transmiterea de căldură la un element încălzitor cu tub comprimat şi necomprimat. Creşterea conductivităţii termice odată cu creşterea temperaturii în tubul necomprimat se explică prin mai buna conductivitate de căldură a aerului cald, precum şi printr-o transmitere de căldură prin radiaţie. Conductivitatea termică a aerului creşte de la 0,03 W/m·°C la 100°C la 0,08 W/m·°C la 1 000°C.

Prin experienţe, s-a stabilit că la încălzitoare electrice în tuburi imersate în apă fierbinte, la diferite puteri specifice ale tubului se obţine o conductivitate termică a stratului izolator de 6,5 W/m·°C. Această valoare

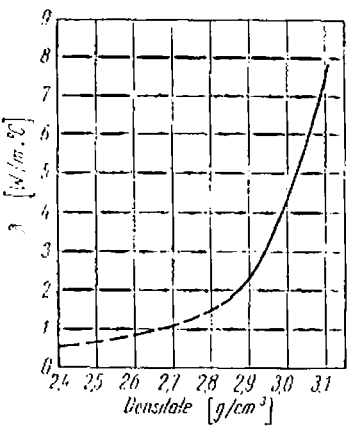


Fig. 3.5. Variaţia conductivităţii termice a oxidului de magneziu în funcţie de densitatea lui, la încălzirea apei (temperatura tubului 100°C).

este aceeaşi la diferite puteri specifice ale tubului, deoarece datorită efectului de răcire a apei fierbinţi asupra tubului, temperatura acestuia din urmă este de circa 100°C

iar temperatura medie a stratului izolator abia depășește 150°C. În fig. 3.5 este arătată variația conductivității termice λ în funcție de densitatea materialului izolant la elementele încălzitoare folosite pentru încălzirea apei. Din diagramă rezultă clar că conductivitatea termică a oxidului de magneziu crește odată cu creșterea densității lui.

În calculul elementelor încălzitoare electrice în tub se poate utiliza o valoare a conductivității termice a oxidului de magneziu de 2,5 W/m·°C pentru elementele care lucrează la temperaturi înalte, în timp ce pentru elementele utilizate la încălzirea apei se alege o valoare de 5 W/m·°C. Cu aceste valori se obțin căderi de temperatură optimale între spirala de încălzire și tub.

Raza de îndoire are o influență deosebită asupra conductivității termice. Figura 3.6 reprezintă variația conductivității termice a izolației în raport cu raza interioară

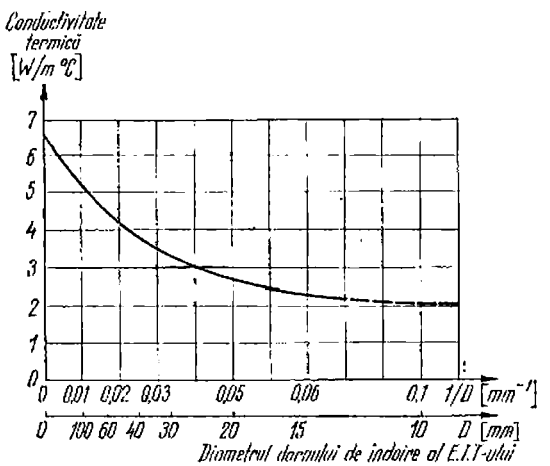


Fig. 3.6. Variația conductivității termice a stratului de oxid de magneziu în funcție de raza de curbură a elementului încălzitor.

de îndoire a elementului încălzitor electric în tub. Valorile se referă la experiența efectuată de firma Kanthal cu țevi din 25 Cr 20 Ni de diametru D_{ei}=9,5 mm și grosimea

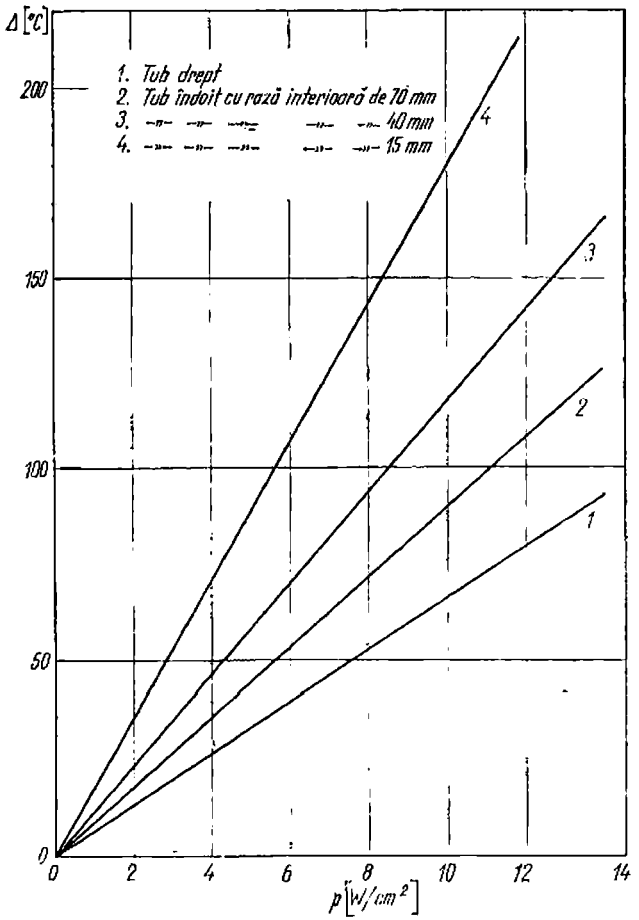


Fig. 3.7. Influența razei de curbură a elementului încălzitor asupra diferenței de temperatură între spirală și tub.

peretelui 0,75 mm comprimate la D_{ed}=8 mm. După umplere cu magnezită de calitate superioară, elementele încălzitoare electrice îndoite au fost încercate în apă fierbinte pentru ca condițiile de încercare să rămînă cît mai constante. Din diagramă rezultă că conductivitatea termică într-o porțiune îndoită poate să scadă la 1/3 din cea a unei porțiuni drepte a aceluiași element încălzitor. În fig. 3.7 este arătată diferența de temperatură între spirală și tub în funcție de puterea specifică a tubului la diferite raze de îndoire. La 10 W/cm^2, de exemplu, s-a măsurat pe o țeavă dreaptă o diferență de temperatură de 67°C între spirală și tub. La aceeași încărcare specifică, dar pentru un element încălzitor îndoit cu o rază interioară de îndoire de 15 mm, a fost constatată o diferență de temperatură de 180°C. Acest lucru se explică prin aceea că la îndoire scade densitatea materialului izolant în locurile de îndoire, înrăutățind transmiterea de căldură. Este deci ușor de înțeles de ce este avantajoasă o presare suplimentară a elementelor încălzitoare în zonele îndoite.

La stabilirea sortimentului de praf izolant trebuie deci să se țină seamă de următoarele:

— densitatea prafului înainte de comprimare să fie de 2,45 g/cm^3, iar după comprimare de 3,05—3,15 g/cm^3. O densitate după comprimare de 3 g/cm^3 nu este satisfăcătoare și ea poate fi utilizată numai în cazurile de funcționare la temperaturi joase;

— rezistența mecanică a materialului tubului limitează creșterea densității prafului izolant obținut în urma comprimării. Astfel, cuprul nu permite obținerea unei densități mai mari a prafului izolant de 3 g/cm^3.

3.3. **Materiale pentru bucșa de ghidare și izolatorii de capăt**

Bucșa de ghidare și izolatorii de capăt se realizează din steatitul CER-1310 (STAS 3471-76) cu o duritate Mohs de 7 la 8 și cu un coeficient de dilatare termică lineară de 7 la $9 \cdot 10^{-6}$ la o temperatură de 20°C la 600°C.

3.4. Materiale pentru tubul metalic

La alegerea calităţii materialului pentru executarea tubului este necesar să se stabilească scopul, domeniul de utilizare, şi hotărîtor în această alegere, temperatura maximă admisibilă sau impusă ce o poate sau trebuie să atingă elementul încălzitor.

În tabelul 3.12 se dau temperaturile maxime admisibile a celor mai des utilizate materiale la construcţia

Tabelul 3.12

Temperaturile maxime admisibile pentru diverse materiale utilizate pentru tubul metalic

Materialul tubului	Temperatura maximă de utilizare, °C
Cupru şi alamă	250
Aluminiu	350
Oţel carbon şi mediu aliat pentru ţevi	450
Oţel inox 18% Cr, 8% Ni, Ti	700
Oţel refractar 25% Cr, 20% Ni	850
Oţel refractar 30% Ni, 20% Cr	900

elementelor încălzitoare electrice în tub, ce nu au fost supuse acţiunii mediilor corozive.

La utilizarea în medii corosive, alegerea materialului trebuie să se facă cu ajutorul tabelelor de coroziune. În unele cazuri, este necesară efectuarea de experimentări în vederea stabilirii celui mai potrivit material pentru tub care să ţină seama şi de tensiunile electrochimice ce pot apărea în funcţionarea elementelor încălzitoare electrice în tub în diferite medii corosive.

Materiale neferoase. Utilizarea cuprului și a alamei este limitată de temperatura maximă admisibilă relativ coborîtă și se utilizează în general la încălzitoare imersate în apă (plonjoare), care sînt protejate galvanic prin nichelare, cromare și cositorire. Tuburile moi, recoapte de Cu și Am, nu se folosesc deoarece în timpul umplerii cu material izolant prin vibrare acestea se curbează, ceea ce compromite procesul tehnologic de umplere. În acest caz este indicat să se folosească numai țevi drepte care să respecte pe cît posibil odată cu creșterea lungimii și condiția de colinearitate.

Caracteristicile fizice, mecanice și tehnologice ale cuprului sînt date în tabelul 3.13. În tabelul 3.14 se dau dimensiunile țevilor de cupru, conform STAS 523-74.

Caracteristicile fizico-mecanice principale și compoziția chimică a alamelor (aliaje de cupru cu zinc) sînt date

Tabelul 3.13

Caracteristicile fizico-mecanice și tehnologice ale cuprului

Denumirea	Unitatea de măsură	Valoarea
Căldura latentă de topire,	cal/g	50,6
Căldura specifică la 20°C,	cal/g·°C	0,092
Conductivitatea termică, la 20°C,	cal/cm·s·°C	0,92
Coeficientul de dilatare liniară între 20°C și 100°C,		$16{,}6 \cdot 10^{-6}$
Densitatea la 20°C,	g/cm³	8,94
Rezistivitate la 20°C,	$\Omega \cdot mm^2/m$	0,017
Coeficientul de temperatură al rezistivității C_t	—	0,00433
Modulul de elasticitate,	kgf/mm²	11 500
Rezistența de rupere,	kgf/mm²	40—50
Rezistența de rupere în stare recoaptă,	kgf/mm²	20—24
Alungirea,	%	6
Alungirea în stare recoaptă,	%	50
Temperatura de prelucrare la cald,	°C	900—1 050
Temperatura de recoacere,	°C	500— 700
Mediul de decapare,	Soluție de 10% H_2SO_4	
Temperatura maximă la suprafața tubului	°C	250

Tabelul 3.14

Caracteristicile constructive ale țevilor de cupru (STAS 523-74)

Diametrul exterior mm	Abateri limită mm	Grosimea peretelui, mm								
		0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3	4	5
		Masa pe metru lungime, kg								
5	±0,10	0,063	0,089	0,11	—	—	—	—	—	—
6		0,077	0,11	0,14	0,19	—	—	—	—	—
7		0,090	0,13	0,17	0,23	—	—	—	—	—
8		0,104	0,15	0,20	0,28	0,34	—	—	—	—
9		0,119	0,17	0,23	0,32	0,40	0,46	—	—	—
10		0,132	0,20	0,25	0,36	0,45	—	—	—	—
11		—	0,21	0,28	0,40	0,51	0,60	0,67	—	—
12		—	—	0,31	0,44	0,56	—	—	—	—
13	±0,12	—	—	0,34	0,48	0,62	0,74	0,84	—	—
14		—	—	0,36	0,53	0,64	0,81	0,92	—	—
15		—	—	0,39	0,57	—	0,88	—	—	—
16		—	—	0,42	0,61	0,79	—	1,10	—	—
17		—	—	—	0,65	0,88	—	—	—	—
18		—	—	0,48	0,70	0,90	—	1,26	1,57	—
19	±0,15	—	—	0,50	0,74	—	—	—	—	—
20		—	—	0,53	0,78	1,01	1,23	1,43	1,79	2,10

în tabelul 3.15. În tabelul 3.16 se dau dimensiunile țevilor de alamă, conform STAS 521-72.

Tuburile de aluminiu sînt, în general, folosite pentru elementele încălzitoare presate în canalele corpurilor de încălzit. În vederea realizării umplerii corespunzătoare, starea de ecruisare a materialului este hotărîtoare, fapt pentru care se utilizează numai țevi de calitate tare. Caracteristicile fizico-mecanice sînt date în tabelul 3.17. Proprietatea sa de a rezista foarte bine la coroziunea atmosferică, deși este un material oxidabil, permite folosirea lui ca element de aliere în proporție de 4—7%, împreună cu 3% cobalt în aliajele Ni-Cr-Fe de înaltă rezistivitate, în vederea obținerii unei refractarități cît mai ridicate, caracterizate prin crearea unei pelicule de protecție de Al_2O_3

Tabelul 3.15

Caracteristicile fizico-mecanice și compoziția chimică a alamelor

Caracteristica/ Calitatea	Unitatea de măsură	Am 60	Am 65	Am 70
Temperatura de topire	°C	890—900	900	925—960
Căldura specifică la 20°C	cal/g·°C	0,09	909	0,09
Conductivitatea termică la 20°C	cal/cm·s·°C	0,29	0,28	0,29
Coeficientul de dilatare liniară între 20° și 300°C		$20{,}8 \cdot 10^{-6}$	$20{,}3 \cdot 10^{-6}$	$19{,}9 \cdot 10^{-6}$
Densitatea la 20°C	g/cm³	8,40	8,40	8,50
Rezistivitatea la 20°C	Ω·mm²/m	0,0062	0,0066	0,0062
Rezistența de rupere a Am 1/2 tare	kgf/mm²	40	36	
Rezistența de rupere a Am calitatea moale	kgf/mm²	34	20	
Alungire calitatea 1/2 tare	%	18	22	
Alungire calitatea moale	%	35	40	
Compoziția chimică				
— Cupru	%	60±2	63±1,5	70±
— Zinc	%	37—41	35—38	28—31
— Plumb	%	0,3—0,8	—	—

Tabelul 3.16

Caracteristicile constructive ale ţevilor de alamă (STAS 521-72)

Diametrul exterior mm	Abateri mm	Grosimea, în mm, şi abateri la grosime					
		0,5± ±0,10	1,0± ±0,10	1,5± ±0,15	2,0± ±0,20	2,5± ±0,25	3,0± ±0,30
		Masa pe metru lungimea, kg					
5	±0,10	0,060	0,106	—	—	—	—
6		0,073	0,133	0,180	—	—	—
7		0,086	0,160	—	—	—	—
8		0,100	0,186	0,260	0,320	—	—
9		0,113	0,213	0,300	0,374	—	—
10		0,126	0,240	0,340	0,427	—	—
11		—	—	0,381	—	—	—
12		0,153	0,293	0,421	0,534	0,634	0,721
13	±0,12	0,166	0,320	0,461	0,587	—	0,801
14		0,180	0,347	0,501	0,641	—	—
15		0,193	0,373	0,541	0,694	—	0,961
16		0,206	0,400	0,581	0,748	—	1,041
17		0,220	—	—	—	0,968	—
18		—	0,450	0,661	0,855	—	1,202
19	±0,15	0,247	0,480	0,701	0,908	—	—
20		—	0,507	0,741	0,962	1,168	1,361

care se formează pe suprafaţa sîrmei rezistive, peliculă ce rezistă la temperaturi mai înalte decît aliajul de bază. Contactul aluminiului cu alte metale trebuie să fie evitat în asamblările pieselor, datorită formării cuplului galvanic, care distruge pelicula protectoare de oxid de aluminiu şi favorizează procesul de coroziune (astfel de cuplu se formează la contactul aluminiului cu cuprul sau cu fierul).

În tabelul 3.18 se dau dimensiunile standardizate ale ţevilor de aluminiu, conform STAS 524-74.

Rezistenţa la coroziune sub acţiunea diferiţilor agenţi chimici a materialelor neferoase utilizate ca ţevi ale elementelor încălzitoare electrice tubulare sînt date în tabelul 3.19. În acest tabel au fost folosite următoarele notări:

Tabelul 3.17

Caracteristicile fizice şi mecanice ale aluminiului

Denumirea	Unitatea de măsură	Valoarea
Temperatura de topire	°C	658,7
Căldura latentă de topire	cal/g	93
Căldura specifică la 20°C	cal/g·°C	0,222
Conductivitatea termică la 20°C	cal/cm·s·°C	0,52
Coeficientul de dilatare liniară între 20 şi 100°C		$23,8 \cdot 10^{-6}$
Densitatea la 20°C	g/cm³	2,7
Rezistivitatea la 20°C	Ω·mm²/m	0,03
Coeficientul de temperatură a rezistivităţii, C_t		0,0042
Modul de elasticitate	kgf/mm²	7 200
Rezistenţa de rupere	kgf/mm²	15
Rezistenţa de rupere în stare recoaptă	kgf/mm²	8
Alungirea	%	5— 10
Alungirea în stare recoaptă	%	30— 40
Temperatura de prelucrare la cald	°C	350—450
Temperatura de recoacere	°C	370—400

Tabelul 3.18

Caracteristicile constructive ale ţevilor de aluminiu (STAS 524-74)

Diametrul exterior mm	Abateri mm	Grosimea peretelui, în mm, cu abateri limită de +10%						
		0,75	1	1,5	2	2,5	3	5
		Masa pe metru lungime, kg						
5	±0,090	0,0270	0,0339	—	—	—	—	—
6		0,0340	0,0424	—	—	—	—	—
8		0,0461	0,0594	0,0827	—	—	—	—
10	±0,075	0,0588	0,0763	0,108	0,136	—	—	—
12		0,0716	0,0933	0,134	0,170	0,201	—	—
14		0,0843	0,110	0,159	0,204	0,244	—	—
15	±0,09	0,0907	0,119	0,172	0,221	0,265	0,305	—
16		0,0970	0,127	0,184	0,238	0,286	0,331	—
18		0,110	0,144	0,210	0,271	0,329	0,382	—
20	±0,105	0,122	0,161	0,235	0,235	0,371	0,433	0,630

Tabelul 3.19

Rezistența la coroziune a materialelor neferoase sub acțiunea agenților chimici

Denumirea agentului chimic	Temperatura mediului încălzit	Cu	Am	Al
Vapori de apă supraîncălziți		C	A până la 200°C	C
Acid sulfuros soluție apoasă	100°C	C		A până la 100°C
Acid sulfuros pentru gaz umed	150°C			A până la 100°C C până la 400°C
Clorură de sulfuril	135°C			A
Hidrogen sulfurat pentru gaz umed peste 100°C	Maxim 150°C			A
Hidrogen sulfurat pentru gaz uscat	Maxim 600°C			A
Triclorură de fosfor	749°C			C
Biosulfați alcalini-soluție apoasă concentrație 10%	80°C			A
Sulfat feric și feros în prezență de aer	480°C	C		C
Amoniac pentru gaz	700°C	C		A
Amoniac amestec cu aer	300°C	C		A
Amoniac soluție apoasă	120°C	C	C	A
Carbonați alcalini soluții apoase până la 10% cu 0,5% sticlă solubilă	110°C			A
Hidroxizi alcalini pământoși	600°C	C		C
Peroxizi	650°C			C
Peroxizi soluții apoase	120°C			C
Nitrat de aluminiu	150°C			C

Tabelul 3.19 (continuare)

Denumirea agentului chimic	Temperatura mediului încălzit	Cu	Am	Al
Sulfat de zinc	740°C			A
Fosfor topit	590°C			C
Sulf topit (114°C)	114°C	C		A
Sulf la temperatura de fierbere	445°C			A
Țiței distilare și instalație de cracare		C	A	C
Alcool metilic până la 75% concentrație	70°C	A	A	A
Alcool metilic orice concentrație	64°C	A	A	
Fenol și crezoli anhidri	182°C			A
Acid formic soluție concentrată (fără aer)	100°C	A		
Acid formic	100°C	A		
Acid acetic glacial (concentrație 90%)	118°C	A (fără aer)	C	A
Acid acetic glacial (concentrație 50—80%)	100°C	A		
Acid acetic glacial (concentrații mici)	100°C	A		
Acid lactic	119°C	A	C	C
Acid citric	115°C			A
Acid benzoic (topituri)	121°C		A	A
Clorură de etilenă	57°C			A
Tetraclorură de carbon	76°C	A	A	C
Tricloretilenă	75°C	A		A
Sulfură de carbon	200°C			A
Rășini (colofoniu)	Temperatură de topire	A		A
Ulei de in	300°C	A		A
Cleiuri animale și gelatină	80°C			A

A — reprezintă o rezistență bună la coroziune, materialul respectiv permițînd să fie folosit fără pericol de corodare. În cazul în care folosirea lui este admisă pînă la o anumită temperatură acest lucru este notat prin valoarea temperaturii lîngă litera A.

C — materialul nu rezistă la coroziune, deci nu poate fi utilizat ca material pentru țeava elementului încălzitor electric în tub. În cazul în care materialul nu poate fi folosit peste o anumită temperatură acest lucru este notat prin valoarea temperaturii respective lîngă litera C.

Materiale feroase. În funcție de condițiile de funcționare și solicitările termice, elementele încălzitoare electrice în tub pot fi executate și din oțeluri carbon pentru țevi OLT, conform STAS 8183-80, sau oțeluri aliate pentru țevi utilizate la temperaturi ridicate, conform STAS 8184-77. Compoziția chimică, și caracteristicile mecanice a acestor oțeluri pentru țevi utilizate la temperaturi ridicate sînt date în STAS-urile de mai sus.

Pentru elementele încălzitoare electrice în tub înglobate în metal prin turnare, sînt folosite tuburi de oțel carbon recoapte, care trebuie să suporte o putere specifică redusă și fără pericol de corodare.

La încărcări termice ridicate sau la folosirea elementelor încălzitoare electrice în medii corozive se impune utilizarea pentru materialul tubului a unor aliaje rezistente la coroziune, oxidare și temperatură (refractare). Elementele principale de aliere la aceste aliaje sînt: nichelul, cromul, titanul etc.

Oțelurile inoxidabile rezistente la temperatură și coroziune sînt folosite la elementele încălzitoare electrice în tub cu puteri specifice ridicate și cu diverse medii corozive. La acestea, este important ca pierderile prin oxidare să fie cît mai mici, acest fenomen avînd ca efect nu numai scurtarea vieții elementului electric încălzitor în tub, ci și incovenientul de a murdări aparatul și a polua mediul în care lucrează elementul încălzitor. În figura 3.8 este dată viteza de oxidare a cîtorva oțeluri inoxidabile folosite în construcția elementelor încălzitoare electrice

în tub, viteza de oxidare ce este exprimată prin greutatea materialului pierdut la diferite temperaturi ale tubului într-un timp dat.

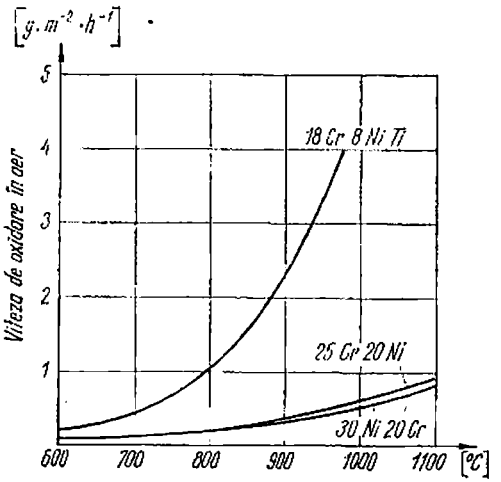


Fig. 3.8. Viteza de oxidare a unor materiale folosite pentru tuburile elementului încălzitor.

Oțelurile inoxidabile și antiacide se împart în trei grupe principale:

— oțeluri crom;

— oțeluri crom-nichel și crom-nichel-molibden;

— oțeluri bogat aliate cu crom, crom-nichel și cu mangan;

Fiecare din această grupă de oțeluri conține un număr mare de produse, cu proprietăți mecanice și fizice deosebite între ele, dar bazate pe o compoziție chimică asemănătoare. Acest lucru determină și comportarea lor asemănătoare la coroziune.

În continuare se dau oțelurile care fac parte din fiecare grupă, compoziția chimică, proprietățile fizice și mecanice și corespondentul între produsele similare din străinătate.

Oţeluri crom. Din punct de vedere al structurii, oţelurile crom se împart în:

— oţeluri martensitice, cu un conţinut în carbon de peste 0,15%;

— oţeluri feritice, cu un conţinut de carbon sub 0,1%;

Conţinutul în crom al acestor oţeluri de peste 12% le face să fie stabile la acţiunea multor medii chimice agresive. Pentru obţinerea unor calităţi superioare a rezistenţei la coroziune şi temperatură, aceste oţeluri se aliază şi cu molibden.

Oţelurile crom au o rezistenţă chimică bună la multe medii agresive, dar sînt depăşite valoric de oţelurile austenitice cu crom şi nichel.

Oţeluri crom-nichel şi crom-nichel-molibden. Toate oţelurile care fac parte din această grupă au structură cristalină austenitică. Ele se împart în două categorii:

— oţeluri crom-nichel ca atare, sau cu elemente de stabilizare Ti, Ta, Nb, Cu;

— oţeluri crom-nichel-molibden ca atare sau cu elemente de stabilizare.

Adaosurile de molibden şi cupru îmbunătăţesc rezistenţa la coroziune. Oţelurile cu 18% crom, 8% nichel cu un conţinut de carbon de sub 0,03% stabilizate cu titan, niobiu sau tantal, au cea mai bună rezistenţă la coroziune.

Oţelurile din această grupă conţinînd molibden sînt mai stabile la aceleaşi medii cînd intervin şi alţi factori ca:

— temperatură mai înaltă;

— amestecuri de soluţii acide avînd în prezenţă şi ionul de clor;

— concentraţii mari ale acizilor organici;

— amestecuri acide conţinînd acid sulfuric.

Faţă de alcalii, rezistenţa acestor oţeluri este în funcţie de temperatură şi concentraţie. La concentraţii mari şi la temperaturi înalte (concentraţii de NaOH de 74%, şi temperaturi în jur de 110°C) viteza de coroziune este influenţată şi de gradul de aerare şi de presiune şi poate ajunge de la 0,7 la 3,15 mm/an.

Oţeluri bogat aliate. Din grupa oţelurilor bogat aliate fac parte următoarele categorii:

— oţeluri bogat aliate cu crom;

— oţeluri bogat aliate cu crom-nichel;

— oţeluri bogat aliate cu mangan.

La aceste oţeluri procentul elementului principal de aliere, cromul şi nichelul, depăşeşte 20% în fiecare aliaj. În ce priveşte manganul, acesta se află într-un procent cuprins între 0,11 şi 0,19%.

Pe lîngă elementele principale de aliere, oţelurile din această categorie mai conţin: molibden, cupru, titan, niobiu.

Aceste oţeluri nu sînt atacate de alcalii, indiferent de concentraţie şi temperatură. Utilizarea lor este limitată numai de considerente economice.

Oţelurile înalt aliate rezistente la coroziune şi temperatură (oţeluri refractare). Se împart în funcţie de elementele principale de aliere în:

— oţeluri refractare cu crom-siliciu-aluminiu;

— oţeluri refractare crom-nichel;

Cromul, elementul principal de aliere, este conţinut între 5 şi 29%, iar procentul optim pentru a asigura stabilitatea la oxidare este de 25%.

Siliciul şi aluminiul îmbunătăţesc rezistenţa la temperatură şi la deformare.

Titanul, niobiul şi tantalul, deşi nu îmbunătăţesc refractaritatea, îmbunătăţesc în schimb rezistenţa chimică la temperatură înaltă.

Rezistenţa la coroziune la gaze acide este dată de elementele de aliere; siliciu; aluminiu şi crom care formează cu oxigenul o peliculă protectoare pe suprafaţa tubului.

Proprietăţile mecanice, fizice, chimice şi termice ale oţelurilor pentru tuburi sînt date în STAS 10321-80, STAS 10322-80, STAS 10358-80 şi STAS 10382-80.

Tabelul 3.20 cuprinde recomandări cu privire la soluţionarea anumitor probleme de coroziune pentru toate oţelurile prezentate şi este întocmit pe baza unei împăr-

țiri chimice a agresivității mediilor industriale, sistematizate în ordinea alfabetică, pe medii anorganice și organice și constituite pe grupele cele mai reprezentative și mai frecvent întîlnite în industrie. Fiecare rînd din tabel se referă la acțiunea corozivă a unui singur mediu chimic asupra materialelor de construcție, indicate la capul coloanei.

Comportarea la coroziune este reprezentată cu semne convenționale (v. tabelul 3.20).

Tabelele de medii cuprind pe lîngă simbolizarea rezistenței la coroziune a materialelor și anumite observații, precizîndu-se limita de temperatură sau concentrația substanței chimice la care poate rezista materialul respectiv.

La materialele la care nu s-au făcut recomandări, datele culese din practică și din literatura de specialitate nu au fost suficiente sau au un caracter contradictoriu.

Unele întreprinderi, specializate în fabricarea utilajelor și materialelor folosite la fabricația elementelor încălzitoare tubulare au elaborat materiale specifice pentru țevi, luînd în considerare solicitările înalte a elementelor încălzitoare electrice în tub. Astfel firma suedeză „Kanthal" fabrică țevi din aliaje rezistente la căldură și coroziune. Caracteristicile fizice și mecanice a acestor materiale sînt date în tabelul 3.21.

Dimensiunile și greutățile tuburilor sînt date în tabelul 3.22.

În tabelul 3.23 se arată în mod orientativ rezistența la coroziune a acestor tipuri de aliaje folosite la fabricarea tuburilor.

În vederea sistematizării în tabelul de coroziune a țevilor Nikrothal s-au făcut următoarele însemnări:

A — reprezintă rezistența bună la coroziune, materialul respectiv putînd fi folosit fără pericol de corodare;

B — materialul poate fi utilizat numai în anumite cazuri;

C — materialul nu poate fi utillzat.

Tabelul 3.20

Indicații privind calitățile anticorosive ale citorva oțeluri și metale neferoase

Nr. crt.	Calitatea oțelului Denumirea agentului chimic	Oțel carbon pentru țevi	Oțel aliat pentru țevi	Oțelul crom		Oțel crom-nichel	Oțel crom-nichel molibdeu	Oțel bogat aliat			Oțel refractar	Al	Cu	Am
				Martensiliconic	Feritic			Crom	Crom-nichel	Mn				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Acid azotic concentrația pînă la 70% pînă la temperatura de fierbere	—	—	—	—	+	+	+	+	+	(+)	(+)	—	—
2	Acid azotic concentrat 90—99%, maximum 60°C	—	—	—	—	+	+	+	+	+		+	—	—
3	Acid brombidric pînă la temperatura de 126°C	pînă la 100°C +	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	Acid bromic, temperatura 20°C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	Acid cianhidric, temperatura 20°C	—	—	—	—	+	+	+	+	+		+	+	+
6	Acid arsenic, temperatura 20°C	—	—	—	—	+	+	+	+	+	—	—	—	—

7	Acid sulfuric peste 100°C diluat cu apă 65%	−	−	−	−	−	−	−	−	−	(+)	−	−	−
8	Acid clorhidric, temperatura 110°C	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
9	Azotat de magneziu topitură	−	−	−	−	+	+	+	+	+	−	+	−	−
10	Acid fluosilicic, temperatura 20°C	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	+
11	Azotat de amoniu topitură	−	−	+	+	+	+	+	+					
12	Bromul temperatura 58°C	−	−	−	−	−	−	−	−	−	+	+	−	−
13	Clorură de magneziu, temperatura 118°C	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
14	Carbonatul de cupru	−	−	+	+	+	+	−	−	−	−	−	−	−
15	Clorurile de cupru, temperatura 1 366°C	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	+	−
16	Clorurile de plumb, temperatura 150°C	−	−	−	−	−	+ maximum	+ 100°C	−	−	−	−	(+)	(+)
17	Carbonatul de magneziu, temperatura 350°C	+	+	+	+	+	+	+	+	+	−	−	+	+
18	Carbonatul de bariu, temperatura 1450°C	+	+	+	+	+	+	Nu este cazul să se folosească				−	−	−

Tabelul 3.20 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
19	Ortofosfat de amoniu, temperatura 170°C	+	+	+	+	–	–	+	+	+	–	–	–	–
20	Fosfatul de potasiu, temperatura 1 340°C	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–
21	Hidroxid de potasiu, temperatura 1 320°C	+	+	+	+	–	–	+	+	+	–	–	+	+
22	Litoponul la temperatură ridicată	+	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
23	Oxidul de carbon, temperatura 900°C	–	+	+ 350°C	+ 400°C	+ 400°C	+ 900°C	+ 900°C	+ 900°C	+ 900°C	+ 900°C	+ 400°C	+ 600°C	+ 600°C
24	Oxizii de plumb, temperatura 300°C	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
25	Permanganat de potasiu, temperatura 240°C	–	–		+		+	+	+	+	–	+	–	–
26	Persulfat de potasiu, temperatura 100°C	–	–	–	–		+		(+)		–	–	–	–
27	Peroxid de potasiu, temperatura 400°C	+	–	(+)		+	+	+	+	+	+ 800°C	+	–	–

28	Percloratul de potasiu (soluție concentrată), temperatura 610°C	+	+		+		+	+	+	+	−	(+)	+	+
29	Pentaclorura de stibiu, temperatura 140°C	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
30	Sulfat de amoniu, temperatura 100°C	−	+	+	+	−	−	−	−	−	−	+	−	−
31	Silicatul de potasiu, temperatura 976°C	+	(+)	+	+	+	+	+	+	+	+	−	+	+
32	Sulfatul de potasiu, temperatura 1 076°C	(+)	−		+		+	Nu se utilizează			−	−	+	+
33	Sulfatul de cupru, temperatura 650°C	−	−	+	+		+	+	−	−	−	−	+	−
34	Sulfitul și metabisulfitul de potasiu, temperatura 190°C	+	+	−	+		+	−			−	−	+	−
35	Sulfuri și polisulfuri, temperatura 250°C	+	+		+		+	−					−	
36	Sulfat de plumb, temperatura 1 000°C	−	−		+	+		+	+	−	−	−	+	+
37	Sulfură de plumb, temperatura 1 110°C	−	−		(+)	(+)	(+)	(+)	(+)			−	−	−

Tabelul 3·20 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
38	Tiocinatul de potasiu, temperatura 500°C	(−)	−		+	+		Nu se utilizează			−	+	−	−
39	Tiocianatul de amoniu, temperatura 170°C	−	−	−		(+)					−	+	−	−
40	Trioxidul de arsen, temperatura 193°C	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	−	−
41	Acetaldehida	+	+	+		+	+	+	+	(+)	+ Nu se utilizează	+	+	+
42	Acetona, temperatura 50°C	+		+		+		+			+ Nu se utilizează	+	+	+
43	Acetil-celuloza	−			+	(−)						+	+	+
44	Acidul boric concentrație temperatura	+		+ 50 % 100°C	+ 50 % 100°C	+ 50 % 100°C	+ 50 % 100°C	+ 50 % 100°C	+ 50 %	+ 50 %			+ 150°C pentru topire	+ 150°C 250°C

NOTĂ: Semnul + înseamnă rezistent (viteza de coroziune de maximum 0,1 g/m²h sau maximum 0,1 mm/an).
Semnul (+) înseamnă relativ rezistent (viteza de coroziune de maximum 1 g/m²h sau maximum 1 mm/an).
Semnul — înseamnă nerezistent (viteza de coroziune nelimitată).

Tabelul 3.21

Caracteristicile fizice și mecanice ale aliajelor Nikrothal

Aliajul	Nikrothal NRT	Nikrothal N2R	Nikrothal N4R	Nikrothal N7R	Fekrothal F18H
Conținutul de elemente în procente	Ni= 9 % Cr=18 % Ti= 5xc	Ni=20 % Cr=25 %	Ni=33 % Cr=20 %	Ni=75 % Cr=14 %	Cr=18 %
Structura	Austenitică	Austenitică	Austenitică	Austenitică	Feritică
Rezistența de rupere în stare recoaptă, kgf/mm^2	65	65	65	60	55
Alungirea în stare recoaptă	50	45	40	45	30
Duritate în stare recoaptă HB	160	160	145	135	160
Densitatea g/cm^3	7,9	7,9	8,1	8,4	7,7
Rezistivitatea, Ω mm^2/m la 20°C	0,75	0,86	0,85	1,03	0,60
la 600°C	1,10	1,12	1,17	1,12	1,06
la 700°C	1,13	1,15	1,20	1,12	1,12
la 800°C	1,16	1,17	1,22	1,13	1,18
la 900°C	1,19	1,20	1,24	1,13	1,20
la 1 000°C	1,21	1,22	1,25	1,14	1,22
la 1 100°C	1,23	1,23	1,27	1,16	—

Tabelul 3.21 (continuare)

Aliajul	Nikrothal NRT	Nikrothal N2R	Nikrothal N4R	Nikrothal N7R	Fekrothal F18R
Căldura specifică, cal/g·°C	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11
Coeficientul de dilatare liniară $=10^{-6}$ m/m·grd Valori medii 20— 600°C	19,0	17,2	16,5	14,4	11,9
20— 700°C	19,3	17,5	16,9	14,9	1,22
20— 800°C	19,5	17,8	17,1	15,4	12,5
20— 900°C	19,7	18,1	17,3	15,8	—
20—1 000°C	19,8	18,4	17,3	16,2	—
Temperatura de topire, °C	1 450	1 400	1 400	1 400	1 450
Temperatura maximă de utilizare la regim permanent al elementului încălzitor tubular, °C	700	900	950	1 000	700

Tabelul 3.22

Caracteristicile constructive ale tuburilor Nikrothal

Dimensiunea tubului Diametrul exterior × grosimea peretelui, mm	Marca tubului					Marca tubului				
	NRT	N2R	N4R	N7R	18R	NRT	N2R	N4R	N7R	18 R
	m/kg					g/m				
12,7×0,75	4,40	4,40	4,35	4,15	4,50	227	227	230	241	222
10 ×0,75	5,70	5,70	5,65	5,35	5,85	175	175	177	187	171
9,5×0,75	6,05	6,05	5,95	5,65	6,20	165	165	168	177	161
8 ×0,6	9,10	9,10	9,00	8,50	9,35	110	110	111	118	107
9,5×0,5	11,50	11,50	11,40	10,80	11,80	87	87	88	93	85
7 ×0,5	12,40	12,40	12,25	11,60	12,75	81	81	82	86	78

Tabelul 3.23

Indicații privind calitățile anticorosive ale aliajelor Nikrothal

Nr. crt.		Temperatura agentului chimic	Nikrothal				Fekrothal F18R
			NRT	N2R	N4R	N7R	
0	1	2	3	4	5	6	7
1	Aceton	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A—B
2	Clorură de aluminiu 5%	20°	B	—	—	A la temperatura de 50°C și concentrația 25%	C
3	Sulfat de aluminiu, 10% Fe	—	A — la temperatura de 20°C B — la temperatura de fierbere	—	—	A — de la 20°C pînă la temperatura de fierbere cu concentrație de 10—50%	C — de la 20°C pînă la temperatura de fierbere
4	Acid formic 5%	20°	A	A	A	A — de la 20°C concentrație 90% B — la 100°C concentrație 90%	B
5	Amoniac, soluție	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A

6	Bicarbonat de amoniu	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
7	Clorura de amoniu, 5%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A—B	A	A	A	B
8	Nitrat de amoniu	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
9	Persulfat de amoniu, 10%	20°	A	A	A	A	A—B
10	Sulfat de amoniu	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	B
11	Acid malic	—	A	A	A	A	—
12	Eter	20°	A	A	A	A	A
13	Alcool etilic	20°C	A	A	A	A	A
14	Benzol	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A

Tabelul 3.23. (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
15	Acetat de plumb	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
16	Borax	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
17	Acid boric	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
18	Acid butiric	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	—	—	A	—
19	Clor umed	20°	C	C	C	C	C
20	Cloroform	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	—
21	Acid cromic, 10%	—	A pentru 20°C B la temperatura de fierbere	—	—	—	A pentru 20°C C la temperatura de fierbere

22	Clorură de fier (III) soluție 5%	20°	C	C	C	C	C
23	Nitrat de fier (III) soluție 5%	20°	A	A	A	A	A
24	Developator pentru fotografii	20°	A	A	A	A	A
25	Acid acetic 80%	—	A — pentru temperatura 20°C C — pentru temperatura de fierbere	—	—	A — pentru temperatura 20°C B — pentru temperatura de fierbere și concentrație 10%	—
26	Sulfat feric (II, III) 5%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	B
27	Formaldehid	20°	A	A	A	A	A
28	Forfurol	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A

Tabelul 3.23 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
29	Acid galic	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
30	Acid tanic	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	B
31	Glicerină	20°	A	A	A	A	A
32	Bicromat de potasiu 25 %	—	A — de la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A — de la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A — de la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A — de la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A — de la 20°C pînă la temperatura de fierbere
33	Clorură de potasiu	—	A — pentru temperatura de 20°C B — pentru temperatura de fierbere	—	—	A — de la 20°C 20°C pînă la temperatura de fierbere	B — pentru temperatura de 20°C C — pînă la temperatura de fierbere
34	Cianură de potasiu	20°	A	A	A	A	A
35	Nitrat de potasiu	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A

36	Permanganat de potasiu 5%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A — 20°C C — pentru temperatura de fierbere
37	Sulfat de potasiu 5%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	—
38	Clorură de calciu 5%	20°C	A	A	A	A — de la 20°C pînă la temperatura de fierbere	B
39	Tetraclorură de carbon	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	—
40	Nitrat de cupru, 10%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
41	Sulfat de cupru, 10%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	B
42	Cianură de cupru	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	—

Tabelul 3.23. (continuare)

0	1	2 C	3	4	5	6	7
43	Clorură de magneziu, 1 %	20°C	B	—	—	A — la temperatura de fierbere și concentrat	B
44	Sulfat de magneziu	20°C	A — pentru temperatura de fierbere	A	A	A — pentru temperatura de fierbere	A
45	Clorură manganoasă 10 %	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	—	—	A — pentru 100°C și 30 % concentrație	—
46	Acid lactic 5 %	20°C	A	A	A	A — 20°C temperatură și concentrație 45 % B — la temperatura de 55°C și concentrație 30 %	C
47	Bisulfat de sodiu 10 %	20°—50°C	A	A	A	A	—
48	Bisulfit de sodiu 10 %	20°C	A	—	—	—	—
49	Clorură de sodiu 5 %	20°C	A	—	—	A — pentru temperatura de fierbere	B

50	Hidroxid de sodiu, 20 %	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	—
51	Carbonat de sodiu 25 %	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
52	Nitrat de sodiu	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
53	Nitrit de sodiu	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	—	—	A	—
54	Peroxid de sodiu, 10 %	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
55	Sulfat de sodiu	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
56	Sulfit de sodiu, 5 %	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	—	—	A	—

Tabelul 3.23. (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
57	Tiosulfat de sodiu 25%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
58	Clorură de nichel	20°C	A	—	—	—	—
59	Sulfat de nichel	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	—
60	Acid oxal 5%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	—	A	A	A	—
61	Fenol	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A

62	Acid fosforic	—	A — pentru temperatura de 80°C și concentrația sub 35 % B — pentru temperatura de fierbere și concentrația de 50 %	—	—	A — pentru temperatura de 20°C și concentrația sub 90 % C — pentru 105°C și concentrația de 60 %	—
63	Acid azotic sub 40 % concentrație	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	—	—	B — pentru 30°C și concentrația 5—25 % A — pentru 30°C și concentrația 25—65 %	—
64	Acid clorhidric sub 1 % concentrație	60° C	B	—	—	B — pentru 30°C și concentrația 5 % C — pentru 85°C și concentrația 5 %	C

Tabelul 3.23. (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7
65	Acid sulfuric	—	A — 20°C temperatură și concentrație 0—5% și 80—100% C — pentru temperatura de 60°C și concentrația sub 1%	—	—	A — temperatura de 20°C și concentrația de 0—70% B — pentru temperatura de fierbere și concentrația sub 1%	—
66	Nitrat de argint, 5%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	A
67	Acid stearic	130°	A	A	A	A	—
68	Tricloretilenă	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	B

69	Acid fosforic 10%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	—
70	Clorură de staniu 5%	20°C	C	—	—	A — pentru temperatura de 100°C	C
71	Clorură de zinc	20°C	B	—	—	A — pentru temperatura de 20°C B — temperatura de fierbere concentrație 30%	C
72	Sulfat de zinc	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	—	—	A — pentru temperatura de 20°C B — pentru temperatura de 100°C	C
73	Acid citric 5%	De la 20°C pînă la temperatura de fierbere	A	A	A	A	C

3.5. Materialele pentru fișele de contact

Fișele de contact se execută din oțeluri automate cu conținut redus de sulf pe strunguri automate.

Creșterea conținutului de sulf are ca urmare mărirea fragilității, și respectiv conduce la ruperea fișei în procesul de laminare a elementului încălzitor electric în tub.

Dacă conținutul de carbon este prea ridicat există pericolul ca în zona de sudură a știftului să se producă o structură martensitică care, de asemenea, poate conduce la fragilitate. În producția de serie a întreprinderilor de specialitate, se folosesc oțelurile: AUT 12 T, AUT 20 T și oțel carbon tras la rece OL 34 TR sau OL 38 TR.

Este foarte important ca fișele înainte de laminare ale tubului să fie recoapte.

Pentru elementele încălzitoare electrice în tub, folosite în condiții termice deosebit de grele, se folosesc oțeluri rezistente la căldură cu următorul conținut: C=0,06%, Ni=20%, Cr=25%, Fe=64%.

În unele cazuri se mai folosesc și fișe de contact din Am 58.

4. Calculul şi dimensionarea elementelor încălzitoare în tuburi metalice

4.1. Influenţa factorilor tehnologici şi funcţionali asupra parametrilor folosiţi la proiectarea elementelor încălzitoare în tub

Una din fazele specifice la executarea elementelor încălzitoare electrice în tub o constituie reducerea secţiunii tubului umplut pentru asigurarea măririi densităţii materialului izolant din interiorul tubului. În urma acestei comprimări, apare schimbarea mărimilor, respectiv a caracteristicilor geometrice, electrice şi termice ale materialelor din componenţa elementelor încălzitoare electrice şi de care trebuie să se ţină seamă în calculele de dimensionare.

Prin operaţia de reducere a secţiunii tubului umplut, cele mai importante modificări sînt:

— alungirea tubului;

— creşterea densităţii materialului izolant prin comprimarea de compactizare, care are ca urmare îmbunătăţirea transmisiei de căldură de la spirala de încălzire la tub. De remarcat faptul că o densitate mai mare a umpluturii, conduce la o bună conductibilitate termică, iar o comprimare exagerată, în paralel cu o măcinare a granulelor umpluturii care schimbă granulozitatea prescrisă a prafului, dăunează conductivităţii termice;

— scăderea rezistenţei electrice a sîrmei de rezistenţă;

— protejarea materialului sîrmei de rezistență de efectul oxidant al aerului și respectiv mărirea duratei de funcționare a elementului încălzitor;

— fixarea poziției spiralei de încălzire în tub.

Această reducere de secțiune în practică este în general de 12—30%. În tabelul 4.1 sînt arătate gradele de

Tabelul 4.1

Gradul de reducere a secțiunii tubului umplut cu praf izolant

Diametrul inițial mm	Diametrul final mm	Grad de reducere %	Diametrul inițial mm	Diametrul final mm	Grad de reducere %
7,0	6,0	14,2	9,5	7,5	21,0
7,5	6,0	20,0	9,93	8,0	19,4
7,5	6,0	20,0	10,0	7,5	25,0
7,6	6,0	21,0	10,0	8,0	20,0
7,95	7,0	11,9	10,0	7,5	25,0
8,0	6,0	25,0	10,2	7,5	26,4
8,0	6,0	25,0	10,5	7,5	28,5
8,0	7,0	12,5	11,1	8,5	23,4
9,0	6,0	33,3	11,6	9,5	18,1
9,0	7,0	22,2	12,0	9,5	20,8
9,5	7,5	21,5	12,0	10,0	16,6
9,5	7,5	21,0	14,0	10,0	28,5

reducere și cele mai întrebuințate diametre inițiale și finale realizabile pe laminorul tip Kanthal.

În general comprimarea de compactare a tubului se realizează prin:

a. operația de laminare care constă din trecerea succesivă a tubului prin mai multe perechi de valțuri cilindrice. Fiecare cilindru are un canal cu secțiune semicirculară corespunzătoare treptei reducției, astfel ca la ieșirea tubului din laminor să se obțină gradul de reducere stabilit anterior;

b. operația de forjare rotativă la care perechile de bacuri de ciocănire sînt acționate de către un sistem de role rotative. Fiecare pereche de bacuri de ciocănire are gaura conică corespunzătoare dimensiunii și gradului de reducere al tubului;

c. presarea în matriță;

d. tragerea prin filiere.

În practică se observă că operația de reducere a secțiunii tubului este însoțită întotdeauna și de o alungire a acestuia. Factorii care condiționează această modificare sînt:

— gradul de reducere al diametrului;

— metoda de comprimare prin care se realizează reducerea diametrului (forjare rotativă, laminare etc.);

— greutatea specifică a umpluturii înainte de presare;

— materialul tubului, precum și grosimea peretelui.

Alungirea tubului în urma comprimării peate să ajungă pînă la 36—38%.

În fig. 4.1 este dată diagrama alungirii tubului în funcție de gradul de reducere pentru următoarele variante:

— materialul tubului din cupru și oțel inoxidabil 25 Cr 20 Ni (Nicrothal N2R);

— diferite grosimi ale peretelui tubului;

— densități diferite ale oxidului de magneziu folosit ca material izolant.

Curbele au fost construite de firma Kanthal pentru elemente încălzitoare electrice în tub umplute și comprimate pe mașini realizate de aceeași firmă.

Analiza diagramei conduce la următoarele observații:

— Cele două curbe inferioare E și F sînt obținute prin folosirea oxidului de magneziu de calitate inferioară cu densitatea de 2,17 g/cm^3;

— La același grad de comprimare se obține o mai mare alungire a tubului în cazul materialului izolant cu densitate mai ridicată.

— La aceeași grosime de perete se obține o alungire mai mare la țevile din materiale mai moi decît la cele din materiale tari;

— La același material alungirea este mai mare la țevile cu pereții mai groși;

— Pentru a obține aceeași densitate a materialului izolant comprimat este necesar un grad de comprimare mai mare în cazul materialului izolant de calitate inferioară (densitate mică).

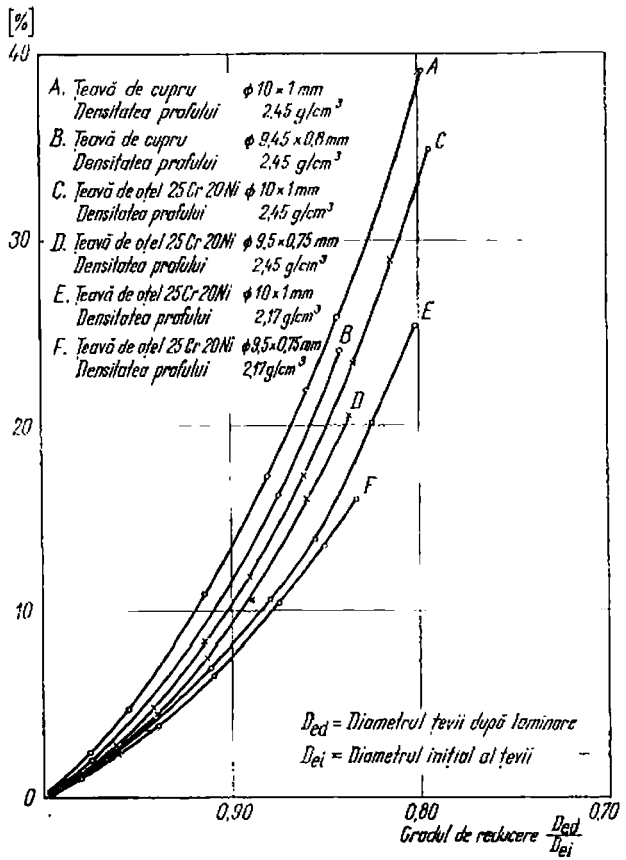

[%]
40
30
20
10
0
A. Țeavă de cupru ϕ 10 × 1 mm
Densitatea profilului 2,45 g/cm³
B. Țeavă de cupru ϕ 9,45 × 0,8 mm
Densitatea profilului 2,45 g/cm³
C. Țeavă de oțel 25 Cr 20 Ni ϕ 10 × 1 mm
Densitatea profilului 2,45 g/cm³
D. Țeavă de oțel 25 Cr 20 Ni ϕ 9,5 × 0,75 mm
Densitatea profilului 2,45 g/cm³
E. Țeavă de oțel 25 Cr 20 Ni ϕ 10 × 1 mm
Densitatea profilului 2,17 g/cm³
F. Țeavă de oțel 25 Cr 20 Ni ϕ 9,5 × 0,75 mm
Densitatea profilului 2,17 g/cm³
A
B
C
D
E
F
D_{ed} = Diametrul țevii după laminare
D_{ei} = Diametrul inițial al țevii
0,90
0,80
0,70
Gradul de reducere $\frac{D_{ed}}{D_{ei}}$

Fig. 4.1. Alungirea tubului în funcție de gradul de reducere a diametrului prin comprimare.

Experiențele au arătat, de asemenea, că materialul tubului determină o anumită densitate maximă a materialului izolant care se poate obține după comprimare.

Astfel, densitatea materialului izolant într-un element încălzitor din țeavă de cupru nu poate fi la fel de ridicată după procesul de comprimare ca într-un tub de oțel crom-nichel. De asemenea, trebuie remarcat că după ce s-a atins densitatea maximă a materialului izolant o

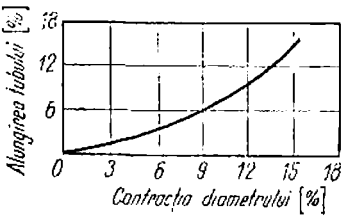


Fig. 4.2. Curba experimentală a alungirii țevii în funcție de contracția diametrului în urma presării.

comprimare ulterioară produce doar o alungire a tubului.

În general, alungirea este influențată în procesul de comprimare, în afară de calitatea materialului tubului, a prafului și a dimensiunilor țevii, și de felul utilajelor folosite. Astfel, prin utilizarea mașinii de forjat rotative se obține o alungire mai redusă decît prin folosirea laminorului de tip Kanthal. Rezultatele practice obținute ale alungirilor tubului sînt date în diagrama din fig. 4.2.

Creșterea greutății specifice a materialului izolant este o urmare a îndesării acestuia prin comprimare și este invers proporțională cu micșorarea volumului interior al tubului. În calculul greutății specifice a materialului izolant, volumul ocupat de spirala din interiorul tubului poate fi neglijat, deoarece acest volum nu depășește decît 2—4% din volumul interior al tubului. În acest sens, coeficientul de creștere a greutății specifice a materialului izolant se determină cu formula:

$$k_y = \frac{D_{ii}^2 L_{ai}}{D_{id}^2 L_{ad}}, \qquad (4.1)$$

unde: D_{ii} este diametrul interior al tubului înainte de comprimare;

D_{id} — diametrul interior al tubului după comprimare;

L_{ai} — lungimea tubului înainte de comprimare;

L_{ad} — lungimea tubului după comprimare.

Notînd raportul:

$$\frac{L_{ad}}{L_{ai}} = a, \tag{4.2}$$

unde a este coeficientul de alungire după comprimare ce se determină experimental, formula (4.1) devine:

$$k_y = \frac{D_{ii}^2}{D_{id}^2} \cdot \frac{1}{a} \tag{4.3}$$

În această formulă D_{ii} este cunoscut, iar D_{id} se poate determina considerînd că greutatea, respectiv volumul tubului metalic înainte și după comprimare rămîn constante. În acest caz putem scrie:

$$(D_{ei}^2 - D_{ii}^2)L_{ai} = (D_{ed}^2 - D_{id}^2)L_{ad},$$

$$\frac{D_{ei}^2 - D_{ii}^2}{D_{ed}^2 - D_{id}^2} = \frac{L_{ad}}{L_{ai}} = a,$$

$$D_{ei}^2 - D_{ii}^3 = a(D_{ed}^2 - D_{id}^2),$$

$$D_{id}^2 = \frac{D_{ed}^2 - D_{ei}^2 + D_{ii}^2}{a}$$

în care prin înlocuirea lui D_{id}^3, din formula (4.3) se obține:

$$k_y = \frac{D_{ii}^2}{aD_{ed}^2 - D_{ei}^2 + D_{ii}^2} \tag{4.4}$$

În cele ce urmează se dă un exemplu practic de calcul, fiind date: $D_{ei}=10$ mm; $D_{ed}=8{,}5$ mm; $D_{ii}=9$ mm; $L_{ad}=550$ mm; $L_{ai}=500$ mm. Se cere: k_y; γ_d și D_{id}.

Înlocuind în formula (4.4) se obține:

$$k_y = \frac{9^2}{\frac{550}{500} \cdot 8{,}5 - 10^2 + 9^2} = 1{,}36.$$

Cu acest coeficient de creștere a greutății specifice a materialului izolant se calculează greutatea specifică la care ajunge după laminare și care va fi:

$$\gamma_d = k_y \cdot \gamma_i, \tag{4.5.}$$

unde: γ_d este greutatea specifică după comprimare a materialului izolant;

γ_i — greutatea specifică înainte de comprimare.

Prin înlocuirea cu valorile date formula (4.5) devine:

$$\gamma_d = 1{,}36 \cdot 2{,}4 = 3{,}2 \text{ gf/cm}^2.$$

În continuare se va determina diametrul interior al tubului după laminare:

$$D_{id} = \frac{1{,}1 \cdot 8{,}5^2 - 10^2 + 9^2}{1{,}1} = 54{,}977 \text{ mm};$$

$$D_{id} = \sqrt{54{,}977} \text{ mm};$$

$$D_{id} = 7{,}41 \text{ mm}.$$

Grosimea peretelui va fi:

$$\frac{D_{cd} - D_{id}}{2} = \frac{8{,}5 - 7{,}41}{2} = 0{,}545 \text{ mm}.$$

După cum s-a arătat anterior, în urma comprimării tubului se modifică rezistența electrică a spiralei de încălzire și anume ea scade, cu toate că se produce o întindere a tubului. Această scădere a rezistenței electrice este o urmare a faptului că fiecare spiră a spiralei de încălzire, suferă o comprimare împreună cu materialul izolant (devenit aproape ca piatra în urma comprimării) în care este înglobată. Ca rezultat apare o creștere a secțiunii sîrmei de rezistență și deci o scădere a rezistenței de care trebuie să se țină seama la calculul elementului încălzitor. Scăderea rezistenței sîrmei de rezistență se determină experimental la fiecare lot de fabricație, dar poate fi determinată și prin calcul pe baza unor date

practice obținute din experiența fabricării elementelor încălzitoare electrice în tub. În general, aceasta este funcție de:

— tehnologia comprimării (forjare, laminare etc.);
— pasul spiralei de încălzire;
— gradul de comprimare.

Practica arată că micșorarea rezistenței la forjare este mai accentuată decît la laminare, astfel, de exemplu, prin micșorarea diametrului tubului prin forjare cu 15—18% rezistența electrică a sîrmei de Kanthal se micșorează cu 20—24% iar prin tragere prin filiere numai cu 3—5%. De asemenea, scăderea rezistenței sîrmei de rezistență este influențată și de pasul spiralei. Variația coeficientului de pas a spiralei între valorile 1,5 și 4 nu are o influență esențială asupra compactității materialului izolant și asupra rezistenței electrice a sîrmei. Se recomandă ca pasul spiralei să nu aibă valori mai mici ca dublul diametrului sîrmei (o întindere a acesteia de 100%). La o întindere a spiralei mai mică de 50% praful izolant introdus în tub nu poate umple complet tot spațiul liber din interiorul tubului și spiralei din cauza spațiilor mici dintre spirele spiralei de încălzire. Mărirea însemnată a pasului peste $7d$ conduce la micșorarea rezistenței electrice cu 15—20%.

În fig. 4.3 este dată curba variației rezistenței electrice a spiralei de încălzire în funcție de micșorarea diametrului țevii la comprimare. Curba este orientativă și ea nu poate fi extinsă la toate materialele pentru tuburi și materiale izolante. Analizînd atît datele practice cît și curbele construite, privind relația dintre gradul de comprimare al tubului și scăderea rezistenței electrice a spiralei de încălzire, putem constata că la o micșorare a diametrului tubului cu circa 16% rezistența electrică a spiralei scade cu circa 23%, iar la o reducere cu pînă la 7% a diametrului tubului aceasta nu se micșorează în mod sensibil (0,7%) și ea poate fi neglijată. Acest lucru se poate explica prin faptul că la începutul comprimării și pînă la limita de circa 7% de reducere a diametrului tubului, materialul izolant încă nu poate exercita o presiune suficient de mare asupra spirelor în așa fel încît

să micşoreze diametrul spiralei de încălzire (deci îngroşarea sîrmei), deoarece în această fază praful se află în stare de pulbere şi nu în cea compactă.

Presarea în continuare a tubului are ca urmare o astfel de îndesare a materialului izolant, încît poate pro-

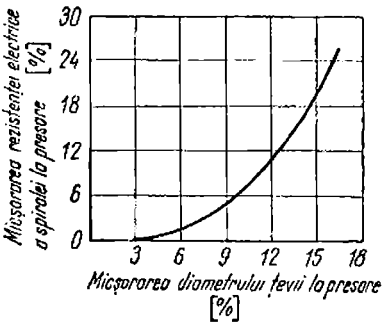


Fig. 4.3. Curba variaţiei rezistenţei electrice a spiralei în funcţie de diametrul ţevii la presare.

voca micşorarea diametrului spiralei de încălzire, deoarece praful trece din stare compactă aproape în stare solidă. Din acest motiv procesul de presare a tubului trebuie împărţit în 2 etape:

— începutul presării pînă la micşorarea diametrului cu circa 7% (de exemplu de la un diametru de 14 mm la 13 mm);

— presarea pînă la obţinerea diametrului final al tubului care este cu circa 16% mai mic decît diametrul iniţial (continuarea presării de la 13 mm diametru pînă la 11,8 mm).

Este de menţionat că o micşorare a diametrului spiralei reprezintă şi o micşorare a lungimii sîrmei rezistive, ceea ce este posibil numai prin mărirea secţiunii ei (volumul sîrmei rămîne constant) şi respectiv aceasta înseamnă o scădere a rezistenţei electrice.

Ca urmare a considerentelor de mai sus, mărimea valorică a scăderii rezistenţei electrice a unei spirale de încălzire se determină în felul următor:

— Se știe că, atît înainte cît și după comprimarea elementului încălzitor în tub, volumul și greutatea sîrmei de rezistență din interiorul tubului rămîn fără modificări:

$$S_i l_i = S_f l_f, \tag{4.6}$$

$$\frac{S_i}{S_f} = \frac{l_f}{l_i} = \frac{d_f}{d_i}, \tag{4.7}$$

unde: S_i, l_i, d_i sînt secțiunea, respectiv lungimea și diametrul sîrmei de rezistență înainte de comprimarea elementului încălzit în tub;

S_f, l_f d_f — secțiunea, respectiv lungimea și diametrul sîrmei de rezistență după comprimarea elementului încălzitor în tub;

— Pentru determinarea modificării secțiunii și lungimii sîrmei de rezistență în procesul comprimării elementului încălzitor în tub, trebuie să se cunoască modificarea diametrului spiralei de încălzire:

$$d_{min\,f} = \frac{D_{ed}}{D_{ei}} d_i, \tag{4.8}$$

$$d_{max\,f} = \frac{D_{ed}}{D_{ei}} d_i = \frac{D_{ed} D_{ei}}{D_i D_{ei}} d_i = b \frac{D_{ed}}{D_{ei}} d_i \tag{4.9}$$

unde: $d_{min\,f}$ este valoarea minimă a diametrului spiralei de încălzire după comprimare;

$d_{max\,f}$ — valoarea maximă a diametrului spiralei de încălzire după comprimare;

D_1 — diametrul exterior al tubului elementului încălzitor în tub după prima etapă de comprimare (de exemplu, de la diametrul tubului de 14 mm la diametrul tubului de 13 mm);

D_{ed} — diametrul exterior al tubului elementului încălzitor după a doua etapă de comprimare (de exemplu, de la diametrul de 13 mm pînă la diametrul de 11,8 mm);

D_{et} — diametrul exterior al tubului elementului încălzitor înainte de comprimare (de exemplu, diametrul de 14 mm);

b = coeficient ce reprezintă raportul $\frac{D_{et}}{D_1}$ a cărei valoare este în jur de 1,08.

În formula (4.8) se presupune că diametrul spiralei se micșorează proporțional cu micșorarea diametrului tubului în timpul comprimării de la diametrul de 14 mm pînă la diametrul de 11,8 mm.

În formula (4.9) se presupune că diametrul spiralei se micșorează proporțional cu micșorarea diametrului tubului doar în procesul celei de a doua etape de comprimare, adică de la diametrul de 13 mm pînă la diametrul de 11,8 mm, iar în procesul primei etape de comprimare de la diametrul de 14 mm pînă la diametrul de 13 mm se presupune că diametrul spiralei de încălzire rămîne fără modificări.

În practică este bine să se folosească formula care dă valoarea medie pentru d_f:

$$d_f = \alpha_0 \frac{D_{et}}{D_{et}} d_i, \tag{4.10}$$

unde:

$$1 < \alpha_0 < b.$$

În cazul nostru: $1 < \alpha_0 < 1{,}08$.

În practică se lucrează cu $\alpha_0 = 1{,}04$.

Modificarea rezistenței electrice a sîrmei de rezistență în procesul de comprimare al elementului încălzitor poate fi exprimată prin următoarea formulă:

$$\frac{R_i}{R_f} = \frac{l_i \cdot S_f}{l_f \cdot S_i}, \tag{4.11}$$

unde: R_i este rezistența electrică a spiralei de încălzire înainte de comprimarea elementului încălzitor;

R_f — rezistența eltctrică a spiralei de încălzire după comprimarea elementului încălzitor.

Prin înlocuire, folosind formula (4.7), raportul $\frac{R_i}{R_f}$ se poate scrie:

$$\frac{R_i}{R_f} = \frac{l_i^2}{l_f^2} = \frac{S_f^2}{S_i^2} = \frac{d_i^2}{d_f^2}. \tag{4.12}$$

Pentru a putea fi folosită relația de mai sus trebuie transformată prin înlocuirea lui d_f cu expresia dată de formula (4.10), situație în care se poate scrie:

$$\frac{R_i}{R_f} = \frac{D_{ei}^2}{\alpha_0^2 D_{ed}^2} = \alpha_r. \tag{4.13}$$

În cele ce urmează se dă un exemplu practic pentru determinarea lui α_r avînd datele următoare:

$D_{ei} = 14$ mm,

$D_{ed} = 11{,}8$ mm,

$\alpha_0 = 1{,}04$,

$$\alpha_r = \frac{R_i}{R_f} = \frac{14^2}{1{,}04^2 \cdot 11{,}8^2} = 1{,}3,$$

valoare ce corespunde cu datele obținute în mod experimental.

În tabelul 4.2 este dată valoarea scăderii rezistenței electrice a spiralei de încălzire în funcție de diametrul sîrmei de rezistență stabilită pe cale experimen-

Tabelul 4.2

Valoarea scăderii rezistenței electrice în funcție de diametrul sîrmei de rezistență, ca urmare a comprimării tubului

Diametrul inițial al sîrmei, în mm	Valoarea scăderii rezistenței în %	Diametrul inițial al sîrmei, în mm	Valoarea scăderii rezistenței, în %	Diametrul inițial al sîrmei, în mm	Valoarea scăderii rezistenței, în %
0,2	30	0,35	25	0,50	19
0,25	28	0,40	23	0,55	18
0,30	27	0,45	21	0,60	16
				0,70	12

tală, Scăderea rezistenței este dată în procente și se calculează cu formula

$$A = \frac{R_i - R_f}{R_i} 100, \qquad (4.14)$$

Se recomandă ca, după executarea seriei zero de elemente încălzitoare electrice în tub, dintr-un lot de fabricație să se controleze valorile rezistenței obținute după comprimare.

Față de încălzitoarele electrice cu rezistențe vizibile sau față de încălzitoarele cu rezistențe înglobate în pastă ceramică izolantă, la care stabilirea dimensiunilor spiralei de încălzire se face în funcție de puterea specifică a sîrmei de rezistență, elementul încălzitor în tub se dimensionează, pe baza puterii specifice a suprafeței exterioare a tubului. Aceasta este definită ca puterea ce revine pe 1cm² a suprafeței active a tubului și se calculează cu formula:

$$p = \frac{P}{\pi L_a D_{ed}}, \quad \left[\frac{W}{cm^2}\right] \qquad (4.15)$$

în care: P este puterea elementului încălzitor în tub în kW.

Cu ajutorul acestor date trebuie stabilite dimensiunile constructive ale elementului încălzitor și anume:

Pentru tub:

— diametrul tubului comprimat;
— lungimea activă a tubului;
— lungimea fișelor de contact;
— lungimea de debitare a tubului comprimat.

Pentru spirala de încălzire:

— diametrul sîrmei de rezistență;
— lungimea sîrmei de rezistență;
— diametrul spiralei de încălzire;
— numărul de spire ale spiralei;
— pasul spiralei;
— lungimea spiralei.

Puterea specifică a elementului încălzitor în tub este influențată de următorii factori:

— mediul de funcţionare (aer liniştit, aer ventilat, apă, diverse lichide şi gaze, ulei, asfalt, parafină, săruri etc.);

— temperatura mediului ambiant;

— viteza de scurgere a lichidelor ce se încălzesc;

— înglobarea elementului încălzitor în tub în metale prin turnare, presare în canal etc;

— existenţa pericolului de a ajunge întîmplător la funcţionare uscată la elementul încălzitor în tub destinat încălzirii lichidelor;

— existenţa termolimitatorului;

— existenţa posibilităţii de carbonizare a mediului încălzit pe suprafaţa elementului încălzitor în tub;

— distanţa între două sau mai multe încălzitoare, respectiv două sau mai multe ramuri ale aceluiaşi încălzitor îndoit.

Factorii de mai sus influenţează şi determină puterea specifică a tubului care se adoptă în calcul şi alegerea materialului din care se execută tubul.

În literatura tehnică de specialitate, precum şi în diferite prescripţii internaţionale sînt date anumite limite ale puterii specifice în funcţie de: mediul în care lucrează elementul încălzitor, caracterul încălzirii, materialul tubului. Aceste valori sînt date în tabelul 4.3 după recomandări CAER şi în tabelul 4.4 după documentaţie tehnică de specialitate ELTRA din R. F. Germania.

Valoarea maximă a puterii specifice care se poate admite la funcţionarea elementului încălzitor în tub este limitată de:

— temperatura maximă admisibilă pentru materialul tubului;

— temperatura maximă admisibilă pentru materialul izolant;

— temperatura maximă admisibilă pentru sîrma de rezistenţă;

— condiţii deosebite impuse elementului încălzitor în tub (de exemplu, la încălzirea uleiului).

Deci pentru a stabili limitele maxime ale puterii specifice trebuiesc cunoscute cît se poate de exact va-

Tabelul 4.3

Valorile puterii specifice admisibile pentru elementele încălzitoare în tub în funcție de mediul încălzit (după recomandare CAER)

Nr. ort.	Mediul încălzit	Caracterul încălzirii	Limita maximă a încărcării specifice W/cm²	Materialul tubului elementului încălzitor
1	Apă, soluție slabă de acizi și baze	Încălzire, fierbere	9	Cupru și alamă (cositorite)
2	Idem	Idem	11	Oțel inoxidabil rezistent la căldură
3	Idem	Idem	9	Oțel carbon
4	Idem	Idem	5	Aliaje de aluminiu
5	Aer și celelalte gaze și amestec de gaze	Încălzire în mediu de aer liniștit pînă la temperatura tubului de 450°C	2,2	Oțel carbon
6	Idem	Idem, de la 450°C pînă la 700°C	5	Oțel inoxidabil rezistent la căldură

Tabelul 4.3 (continuare)

Nr. crt.	Mediul încălzit	Caracterul încălzirii	Limita maximă a încărcării specifice W/cm²	Materialul tubului elementului încălzitor
7	Idem	Încălzirea în mediu de aer care se deplasează cu viteza de minim 6 m/s (calorifere sulfante etc.) pînă la temperatura tubului elementului încălzitor de 450°C	5,5	Oțel carbon
8	Aer și alte gaze și amestec de gaze	Încălzire în mediu de aer care se deplasează cu viteza de minimum 6 m/s (calorifere suflante etc.) la temperatura tubului elementului încălzitor de la 450°C pînă la 600°C	6,5	Oțel inoxidabil rezistent la temperaturi înalte
9	Aer și alte gaze și amestec de gaze	Idem, pînă la temperatura tubului elementului încălzitor de 450°C	2,5	Oțel carbon
10	Idem	Idem, la temperatura tubului elementului încălzitor de la 450°C pînă la 650°C	5,1	Oțel inoxidabil rezistent la temperaturi înalte
11	Grăsimi comestibile, uleiuri minerale	Încălzire în băi și recipiente pînă la temperatura tubului elementului încălzitor de 300°C	3,0	Oțel carbon

Tabelul 4.3 (continuare)

Nr. crt.	Mediul încălzit	Caracterul încălzirii	Limita maximă a încărcării specifice W/cm²	Materialul tubului elementului încălzitor
12	Alcalii, silitră	Topirea şi încălzirea pînă la temperatura de 550°C	3,5	Oţel inoxidabil rezistent la temperaturi înalte
13	Metale uşor fuzibile, aliaje tipografice, staniu, plumb etc.	Încălzire şi topire în băi pînă la temperatura tubului elementului încălzitor de 450°C	3,5	Oţel carbon
14	Forme turnate, forme de presare	Elementele încălzitoare aşezate în orificiu. Încălzire pînă la temperatura tubului elementului încălzitor de 450°C	8	Oţel carbon
15	Plite metalice din aliaje din aluminiu	Elementul încălzitor înglobat în produs. Funcţionarea cu limitatoare de temperatură pînă la 250°C	13	Oţel carbon
16	Forme metalice (oţel şi de fontă)	Elementul încălzitor înglobat în aluminiu şi introdus în forme, temperatura de încălzire pînă la 200°C	8	Oţel carbon

Tabelul 4.4

Valorile puterii specifice admisibile în funcție de mediul încălzit (după documentațiile ELTRA)

Nr. crt.	Mediul încălzit	Caracterul încălzirii	Limitele maxime ale încărcării specifice W/cm²	Materialul tubului elementului încălzitor
1	Apă cu circulație forțată	Încălzire, fierbere	15	Cupru, oțel inoxidabil Cu 17—19% oțel inoxidabil Cr; 9—11,5% Ni sau 16,5—18,5% Cr; 12,5—15% Ni; 2,5 —3% Mo
2	Leșie de spălat		10	Idem
3	Apă	Încălzire, fierbere cînd există pericolul funcționării uscate a elementului încălzitor	6	Oțel inoxidabil cu 17—19% Cr, 9—11,5% Ni sau 16,5—18,5% Cr, 12,5—15% Ni; 2,5—3% Mo
4	Băi alcaline		6	Oțel carbon
5	Soluții apoase de acizi		2,5	Oțel inoxidabil cu 16,5—18,5% Cr, 12,5—15%Ni 2,5—3% Mo
6	Băi de fosfatare		4	Idem ca la poziția 3
7	Glicerină		2,3	Oțel inoxidabil cu 17—19% Cr, 9—11,5% Ni
8	Diphyl		2	Oțel carbon
9	Ulei fluid	Încălzire pînă la 50°C	4	Oțel caron
10	Ulei fluid	Idem, pînă la 100°C	2,5	Oțel carbon

Tabelul 4.4 (continuare)

Nr. crt.	Mediul încălzit	Caracterul încălzirii	Limitele maxime ale încărcării specifice W/cm²	Materialul tubului elementului încălzitor
11	Ulei fluid	Idem, pînă la 250°C	2	Oțel carbon
12	Ulei fluid	Idem, pînă la 350°C	1,5	Oțel carbon
13	Ulei în mișcare		4	Oțel carbon
14	Ulei	Elementul încălzitor funcționînd în aparate pentru fierberea uleiului comestibil	5,5	Oțel inoxidabil cu 17—19% Cr, 9—11,5% Ni
15	Cadron		1	Oțel carbon Oțel inoxidabil cu 17—19% Cr, 9—11,5% Ni
16	Baie de plumb	Încălzire și topire	4	Oțel inoxidabil cu 17—19% Cr, 9—11,5% Ni
17	Aer	Temperatura aerului staționar înconjurător 20°C	1,4	Oțel carbon
18	Aer	Idem	5	Oțel inoxidabil cu 17—19% Cr, 9—11,5% Ni
19	Aer	Idem	6	Oțel inoxidabil cu 25% Cr, 25% Ni
20	Aer	Idem, 150°C	1,5	Oțel carbon
21	Aer	Idem	4,5	Oțel inoxidabil cu 17—19%Cr 9—11,5% Ni

Tabelul 4.4 (continuare)

Nr. crt.	Mediul încălzit	Caracterul încălzirii	Limitele maxime ale încărcării specifice W/cm²	Materialul tubului elementului încălzitor
22	Aer	Idem	5,5	Oțel inoxidabil cu 25% Cr, 25% Ni
23	Aer	Idem	4	Oțel inoxidabil cu 17—19% Cr, 9—11,5% Ni
24	Aer	Idem, 250°C	0,8	Oțel carbon
25	Aer	Idem	5	Oțel inoxidabil cu 25% Cr, 25% Ni
26	Aer	Idem, 350°C	3,5	Oțel inoxidabil cu 17—19% Cr, 9—11,5% Ni
27	Aer	Idem	4,5	Oțel inoxidabil cu 25% Cr, 25% Ni
28	Corpuri solide	Încălzirea prin contact fără reglarea temperaturii	2	Oțel carbon
29	Corpuri solide	Idem	3	Oțel inoxidabil cu 17—19% Cr, 9—11,5% Ni
30	Metale ușoare	Elementul încălzitor înglobat prin turnare fără reglarea temperaturii	5	Oțel carbon
31	Metale ușoare	Idem, cu reglarea temperaturii	10	Oțel carbon

lorile temperaturilor pentru tub, materialul izolant şi sîrma de rezistenţă în diferite condiţii şi medii de funcţionare în funcţie de puterea specifică.

Temperatura tubului în funcţie de puterea specifică pentru diferite condiţii şi medii de funcţionare a fost determinată pe cale experimentală şi dată în diferite diagrame şi tabele care vor fi prezentate în cele ce vor urma.

După stabilirea temperaturii tubului, temperatura sîrmei de rezistenţă se poate calcula analitic sau stabili pe cale grafică din formula căderii de temperatură între spirala de încălzire şi tub.

Temperatura materialului izolant poate fi considerată ca media aritmetică a temperaturii tubului şi sîrmei de rezistenţă.

Aceste valori sînt influenţate în cea mai mare măsură de intensitatea şi de modul cum este transmisă căldura dezvoltată de spirala de încălzire prin ansamblul acestor materiale către mediul care trebuie încălzit. În cazul în care transmiterea de căldură se face foarte bine, atunci solicitarea termică a materialelor componente ale elementelor încălzitoare în tub este mai mică şi pot fi admise încărcări specifice mai ridicate. Se poate afirma, ca regulă generală, că dacă temperatura şi viscozitatea au valori scăzute, iar viteza de scurgere şi conductivitatea termică a mediului fluid ce urmează a fi încălzit au valori ridicate, atunci puterea specifică maximă admisă a elementului încălzitor în tub creşte foarte mult şi, de asemenea, cu cît temperaturile maxime admisibile ale fiecăruia dintre materialele componente sînt mai ridicate, cu atît mai ridicate pot fi valorile puterilor specifice. Totodată se poate spune că, dacă regimul de funcţionare al elementului încălzitor în tub se face la puteri specifice la care temperatura tubului, a materialului izolant şi a sîrmei de rezistenţă sînt mai apropiate de cele maxime admise iar diferenţa de temperatură între ele este mai mică, atunci se realizează o utilizare mai completă a materialelor folosite.

În regimuri de funcționare condiționate de temperaturi moderate, situații în care nu se poate asigura folosirea maximă a tuturor materialelor, se va căuta o soluție constructivă mai economică, în sensul că se aleg materiale mai puțin deficitare și cu preț de cost scăzut.

Valorile maxime admisibile ale temperaturii materialului izolant și a sîrmei de rezistență sînt tratate la subcapitolele 3.1 și 3.2.

În continuare se va examina dependența temperaturii tubului elementului încălzitor funcție de puterea specifică în diferite condiții și medii de funcționare.

Temperatura tubului elementului încălzitor înglobat în metal. La elementul încălzitor electric în tub înglobat în metal prin turnare există un contact aproape perfect între tub și metalul înconjurător, astfel încît căderea de temperatură între ele poate fi neglijată. Elementele încălzitoare sînt înglobate în general în aluminiu prin turnare și acestea sînt termostate. De exemplu: talpa fierului de călcat cu termoregulator, plita electrică etc. Datorită conductivității termice bune ce există între tub și metalul înconjurător nu există pericolul unei supraîncălziri a elementului încălzitor electric în tub atîta timp cît termostatul funcționează perfect. Prin urmare astfel de elemente încălzitoare în tub pot fi încărcate la valori destul de ridicate de 13 pînă la 16 W/cm^2.

În fig. 4.4 este arătată variația temperaturii suprafeței piesei metalice (plită) cu elementul încălzitor în tub înglobat prin turnare, în funcție de puterea specifică.

Valorile puterii specifice admisibile pentru elementul încălzitor în tub înglobat în metal sînt date în tabelul 4.3 și 4.4.

Temperatura tubului elementului încălzitor funcționînd în lichide. La elementul încălzitor în tub care lucrează în lichide, de exemplu în apă sau ulei, transmiterea de căldură se face prin convecție.

Temperatura tubului și puterea specifică este limitată pe de o parte de viteza de scurgere a lichidului, iar pe de altă parte de depunerile de reziduri pe suprafața tubului care pot reduce transmiterea normală de căldură.

La funcționarea în apă a elementului încălzitor, valoarea temperaturii tubului se poate lua 105°C, deoarece căderea de temperatură între tub și apă nu depășește

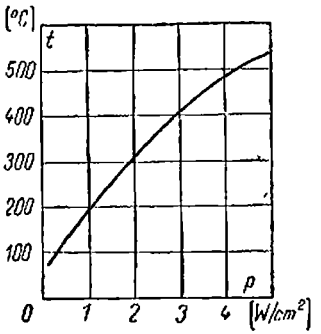


Fig. 4.4. Temperatura plitei electrice în funcție de puterea specifică.

5—6°C în timpul fierberii și 55—65°C la începutul încălzirii. Puterea specifică a tubului poate atinge 13—15 W/m² la o circulație forțată a apei.

Un rol hotărîtor în alegerea valorii puterii specifice îl joacă duritatea, respectiv conținutul de calcar al apei. Formarea pietrei de cazan începe deja la o temperatură de 65°C și crește odată cu temperatura și duritatea apei. În acest sens se folosește mai mult țeavă de cupru și alamă sau oțel inoxidabil cu o sarcină maximă admisă de 10 W/m² care coboară însă la circa 3 W/cm² în cazul unei ape cu conținut mărit de calcar (fără circulația forțată a apei). Depunerea pe suprafața tubului a crustei izolante, împiedică transmiterea normală de căldură de la tub la apă și implicit de la sîrma de rezistență la stratul izolant și conduce la supraîncălzirea spiralei de încălzire.

De asemenea, un rol important care limitează puterea specifică îl are forma și distanța dintre tuburile elementului încălzitor în tub alăturate (fie în formă curbată sau dreaptă) care trebuie să fie de minimum 10 mm în cazul apei dedurizate și de 15 la 20 mm în ca-

zul apei cu calcar. Un exemplu în acest sens îl constituie mașinile de spălat la care există pericolul unor depuneri de calcar sau detergent în condițiile unui spațiu de montaj limitat, situație în care se recomandă o valoare maximă de 6 la 10 W/cm² a puterii specifice.

În cazul în care există mijloace de protejare a elementului încălzitor în tub împotriva supraîncălzirii sau funcționării în mediu uscat, se pot admite puteri specifice superioare față de cele de mai sus.

În cazul în care aparatul nu este dotat cu termolimitator împotriva supraîncălzirii sau funcționării în mediu uscat trebuie să se țină seama de folosirea unui material inoxidabil pentru tub care să admită o putere specifică de circa 6—8 W/cm² și să se aibă în vedere funcționarea de scurtă durată și în condiții anormale a elementului încălzitor în tub.

În tabelul 4.3 și 4.4 se dau și valorile admisibile ale puterii specifice ale elementului încălzitor în tub funcționînd în apă.

Temperatura tubului la elementul încălzitor cu funcționare în ulei. În condițiile încălzirii uleiului, puterile specifice admisibile se limitează în special la evitarea posibilității de ardere a uleiului pe suprafața tubului. Căderea de temperatură între elementul încălzitor și ulei depinde de viscozitatea acestuia care la rîndul ei depinde de temperatură. Acest lucru se explică prin aceia că, la temperaturi mici viscozitatea uleiului crește, fenomen care în cazul de față conduce la înrăutățirea convecției uleiului încălzit și la evacuarea căldurii din elementul încălzitor și implicit la admiterea unor puteri specifice mai mici sau mai mari în funcție de viscozitatea uleiului. Astfel la fierbătoare de ulei comestibil puterea specifică maximă poate să atingă valoarea de 5 W/cm² (elementul încălzitor din tub de oțel inoxidabil) pe cînd la instalațiile industriale pentru încălzirea păcurei această valoare nu poate depăși 2—3 W/cm². Temperatura tubului elementului încălzitor cu funcționare în ulei la o putere specifică de 2,8 W/cm² este dată în tabelul 4.5.

Tabelul 4.5

Diferența de temperatură dintre tub și ulei la o putere specifică a elementului încălzitor de 2,8 W/cm²

Temperatura uleiului încălzit °C	Temperatura tubului °C	Diferența de temperatură °C
15	150	135
40	147	107
75	142	67
90	142	52
100	144	44

În practică s-a stabilit că pentru încălzirea uleiului se poate admite o putere specifică de 2,5—3 W/cm².

În tabelul 4.3 și 4.4 se dau valorile puterii specifice ale elementului încălzitor în tub pentru diferite produse petroliere.

Temperatura tubului la topirea parafinei. La topirea parafinei ca și la încălzirea uleiului, criteriul de putere specifică admis nu este cel al temperaturii maxime a spiralei ci cel al temperaturii la suprafața tubului în contact cu parafina netopită. În stare solidă parafina are conductibilitate termică redusă și de aceea încălzitoarele tubulare la începutul încălzirii ating temperaturi pînă la 180°C, la o încărcare specifică de 2,8 W/cm².

După topirea parafinei la temperatura de 100°C, în stare lichidă se asigură o bună evacuare a căldurii din elementul încălzitor. Căderea de temperatură între tub și parafină nu depășește 12—25°C la o putere specifică de 0,5—2,8 W/cm², ceea ce înseamnă că temperatura tubului nu depășește 120°C. Bazîndu-se pe aceleași considerente ca la încălzirea uleiului puterea specifică nu trebuie să depășească 3 W/cm².

Temperatura tubului în medii gazoase. Transmiterea de căldură în aer sau gaze staționare se face prin radiație și convecție. La gaze sau aer în mișcare cantitatea de căldură transmisă prin convecție crește odată cu creșterea vitezei de scurgere. În orice situație, în care cedarea de căldură de la elementul încălzitor în tub către mediul gazos este redusă la aceeași putere

specifică a tubului, se produce o supraîncălzire atît a tubului cît și a spiralei care în final cauzează scoaterea prematură din funcțiune a elementului încălzitor în tub. O astfel de situație poate fi cauzată de concentrarea exagerată de putere datorită strîngerii una lîngă alta a ramurilor elementului încălzitor în tub îndoit, adică nerespectării distanței minime între două sau mai multe corpuri încălzitoare sau a retransmiterii căldurii radiate de către un alt corp etc.

Un element încălzitor drept, funcționînd în aer liber la o putere specifică de 3 și 5 W/cm², ajunge la o temperatură a tubului de 550°C, respectiv de 650°C. Același element încălzitor lucrînd în aceleași condiții, însă forma lui nefiind dreaptă, ci spirală, cu un diametru al spiralei de 40 mm și cu un pas al spiralei de 18 mm ajunge la o temperatură de 650°C și respectiv 770°C.

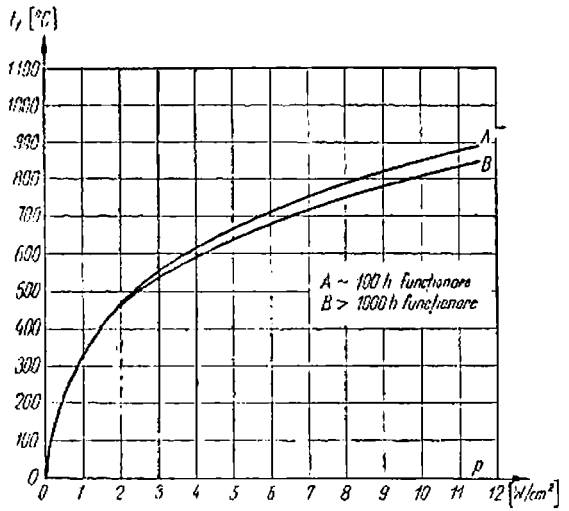


Fig. 4.5. Variația temperaturii tubului unui element încălzitor cu ∅=8 mm, cu poziție dreaptă orizontală, în funcție de puterea specifică.

Determinarea temperaturii tubului elementului încălzitor funcționînd în aer se face folosind diagramele stabilite pe cale experimentală din fig. 4.5. Acestea re-

prezintă variația temperaturii tubului elementului încălzitor de formă dreaptă în funcție de puterea specifică, elementul funcționînd în aer staționar cu temperatura 20°C.

În fig. 4.6 este arătată variația temperaturii tubului elementului încălzitor în aer staționar a cărui temperatură ajunge pînă la 800°C.

În fig. 4.7 este dată diagrama temperaturii tubului elementului încălzitor în diferite medii de funcționare a căror temperatură este de 20°C. Pe diagramă este indicată și limita temperaturii maxime admise pentru unele materiale folosite curent la executarea tubului.

Temperatura tubului elementului încălzitor funcționînd în curent de aer cu diferite viteze de mișcare. Ca și în cazul precedent, cu funcționare în aer staționar, temperatura tubului ce lucrează în curent de aer cu diferite viteze de deplasare se poate stabili cu ajutorul diagramelor determinate pe cale experimentală. În acest sens, în figurile 4.8; 4.9; 4.10 și 4.11 este reprezentată temperatura tubului în funcție de puterea specifică la diferite viteze ale aerului în 4 variante ale temperaturii aerul înconjurător: 20°C, 150°C 250°C și 350 C.

Din analiza acestora se poate trage concluzia că într-un curent de aer cedarea de temperatură se îmbunătățește, deci scade temperatura tubului și respectiv aceasta conduce la îmbunătățirea randamentului termic al căldurii cedate și la fabricarea unor oțeluri mai puțin scumpe.

La stabilirea puterii specifice ce se admite în calcul, pot apărea următoarele variante:

a. Se alege din diagramele și tabelele prezentate anterior valoarea cea mai mare posibilă pentru puterea specifică în condițiile de exploatare date și pentru temperatura maximă a materialului tubului de care se dispune pentru confecționarea elementului încălzitor, variantă care presupune că nu există o limită ce condiționează temperatura de funcționare a tubului.

b. Pentru anumite medii încălzite și criterii de exploatare este impus materialul tubului (exemplu aluminiu), implicit și temperatura maximă admisă pentru care

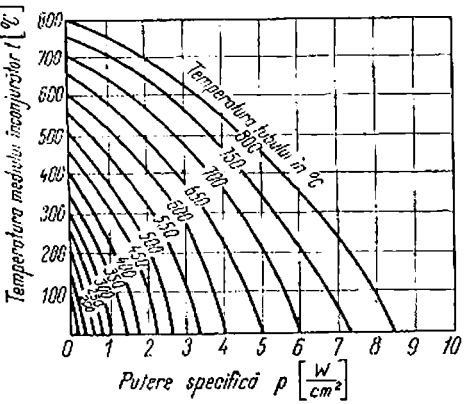


Fig. 4.6. Variația temperaturii tubului în aer liniștit a cărui temperatură ajunge pînă la 800°C.

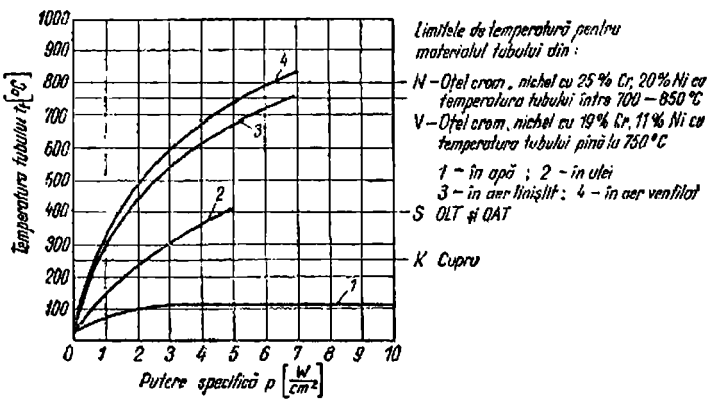

Temperatura tubului t_t [°C]
Putere specifică p [W/cm²]
Limitele de temperatură pentru materialul tubului din :
N – Oțel crom, nichel cu 25% Cr, 20% Ni cu temperatura tubului între 700 – 850 °C
V – Oțel crom, nichel cu 19% Cr, 11% Ni cu temperatura tubului pînă la 750 °C
1 – în apă ; 2 – în ulei
3 – în aer liniștit ; 4 – în aer ventilat
S OLT și OAT
K Cupru

Fig. 4.7. Temperatura tubului în diferite medii de funcționare.

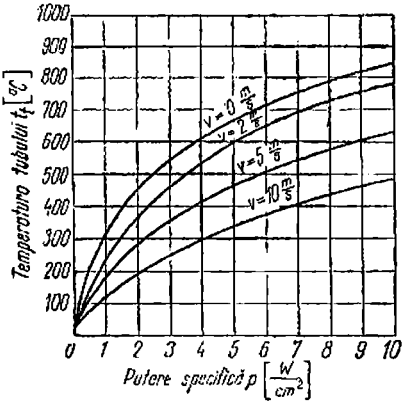


Fig. 4.8. Temperatura tubului în funcție de puterea specifică la diferite viteze ale aerului; temperatura mediului înconjurător 20°C.

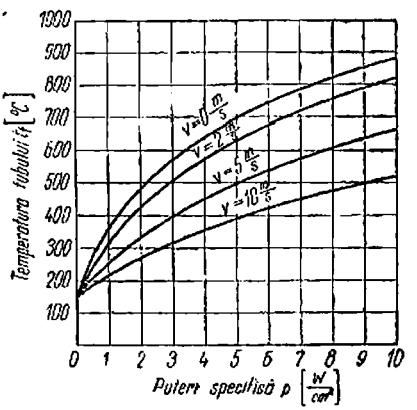


Fig. 4.9. Temperatura tubului în funcție de puterea specifică la diferite viteze ale aerului; temperatura mediului înconjurător 150°C.

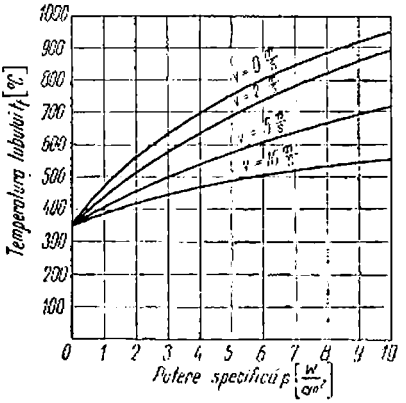


Fig. 4.10. Temperatura tubului în funcție de puterea specifică; temperatura mediului înconjurător 250°C.

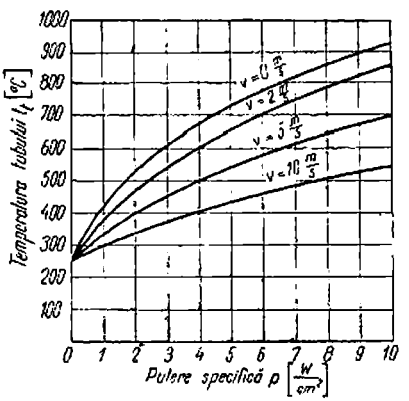


Fig. 4.11. Temperatura tubului în funcție de puterea specifică; temperatura mediului înconjurător 350°C.

se scoate din tabelele și diagramele prezentate anterior puterea specifică.

c. În funcție de condițiile de lucru ale elementului încălzitor în tub este precizată de la început temperatura maximă a tubului (exemplu încălzirea uleiului). În acest caz se alege materialul tubului și din tabelele și diagramele prezentate la subcapitolul 4.1 se scoate valoarea puterii specifice. După stabilirea temperaturii de funcționare a tubului în funcție de puterea specifică, se poate trece la dimensionarea elementului încălzitor, urmînd ca după aceasta să se verifice temperatura sîrmei de rezistență și a materialului izolant.

4.2. Dimensionarea tubului

Fiind dată puterea elementului încălzitor și stabilită puterea specifică pe suprafața exterioară a tubului se poate determina suprafața activă a tubului F cu ajutorul formulei:

$$F = \frac{P}{p} \ [\text{cm}^2], \tag{4.16}$$

în care: P este puterea, în W;

p — puterea specifică a tubului, în W/cm².

Cunoscînd suprafața activă a tubului se poate determina lungimea activă care va fi calculată cu formula:

$$L_{ad} = \frac{F}{\pi \cdot D_{ed}} \tag{4.17}$$

în care: D_{ad} este diametrul exterior al tubului după comprimare (laminare).

La stabilirea lungimii tubului trebuie ales în prima variantă de calcul, diametrul tubului din seria diametrelor uzuale: 12,0; 11,8; 11,0; 10,0; 8,8; 8,5; 7,6; 7,3; 6,8; 6,5; 6,2 și 6,0 mm.

Totodată se va ține seama de dimensiunile spațiului în care trebuie să se monteze elementul încălzitor

precum și de posibilitățile de execuție ale conexiunilor de legătură electrică la rețea.

Se determină lungimea totală a tubului L_{td} cu formule:

$$L_{td}=L_{ad}+L_{id}, \tag{4.18}$$

în care:

$$L_{id}=2L_b, \tag{4.19}$$

unde: L_b este lungimea fișei de contact în tub și are valoarea L_b=15—105 mm.

Pentru stabilirea lungimii la care se debitează tubul înainte de laminare trebuie cunoscut gradul de alungire care depinde la rîndul său de gradul de comprimare și de calitatea și starea de ecruisare a materialelor. Acesta se determină din diagrame pentru materiale folosite pentru tub sau se determină experimental pentru fiecare lot (vezi fig. 4.1) și are o valoare de 1,10—1,35.

Astfel, lungimea activă a tubului înainte de laminare va fi:

$$L_{at}=\frac{L_{ad}}{a}. \tag{4.20}$$

Lungimea totală, înainte de laminare, la care se debitează tubul

$$L_{tt}=\frac{L_{td}}{a}, \tag{4.21}$$

unde: a este coeficientul de alungire [vezi formula (4.2].

4.3. Dimensionarea spiralei de încălzire

Elementele constructive ce trebuie determinate sînt: diametrul sîrmei, lungimea sîrmei, diametrul spiralei, numărul de spire și pasul spiralei.

Pentru determinarea diametrului se calculează mai întîi rezistența la cald a spiralei R_i cu formula:

$$R_i=\frac{U^2}{P}, \tag{4.22}$$

unde: U este tensiunea, în V;
P — puterea, în W;
apoi rezistența la rece R_{20} cu formula:

$$R_{20} = \frac{R_t}{C_t} \tag{4.23}$$

unde: C_t este coeficientul de variație a rezistivității sîrmei de rezistență cu temperatura. Valoarea lui în funcție de tipul sîrmei utilizate este dată în tabelele 3.1—3.6, 3.8 și 3.9.

Cunoscut fiind faptul că rezistența sîrmei scade prin comprimarea elementului încălzitor trebuie calculată și valoarea rezistenței la rece înainte de comprimare R^1_{20} cu formula:

$$R^1_{20} = \alpha_r R_{20}$$

unde: α_r este coeficientul de scădere al rezistenței calculat cu formula (4.13) și determinat experimental.

Valoarea orientativă a acestuia în cazul reducerii diametrului prin forjare, este dată în diagrama din fig. 4.3. În continuare, pentru a putea determina diametrul sîrmei este necesar să se determine raportul $\frac{S_{sp}}{S^1_{20}}$, în care S_{sp} este suprafața spiralei de încălzire și a cărei valoare este:

$$S_{sp} = \frac{P}{P_{sp}}, \tag{4.25}$$

unde: P_{sp} — puterea specifică a sîrmei de rezistență, în W/cm².

Valoarea puterii specifice a sîrmei de rezistență este cuprinsă între 10 și 30 W/cm². Se menționează că prin folosirea acestor valori în calcul temperatura maximă de utilizare a sîrmei de rezistență nu este depășită.

Cunoscute fiind suprafața spiralei de încălzire și rezistența la rece înainte de laminare R^1_{20} se calculează raportul:

$$\frac{S_{sp}}{R^1_{20}} \quad [\text{cm}^2\Omega] \tag{4.26}$$

cu a cărui valoare se determină diametrul sîrmei de rezistență, din tabelele: 3.2, 3.4, 3.5, 3.6, 3.8 și 3.9, pentru cele mai des întrebuințate materiale de sîrmă rezistivă.

Fiind stabilit diametrul sîrmei se obține din aceleași tabele (mai sus indicate) rezistența r pe metrul liniar. Cu ajutorul valorilor de mai sus se calculează lungimea activă a sîrmei rezistive:

$$l = \frac{R_{20}^{1}}{r} \quad [\text{m}], \tag{4.27}$$

unde: r este rezistența pe metrul liniar a sîrmei, în Ω/m.

Luînd pentru grosimea stratului materialului izolant q_{st} valoarea de 1,0÷3,0 mm se determină diametrul exterior al spiralei de încălzire $D_{ext\ sp}$ cu formula:

$$D_{ext\ sp} = D_{id} - 2q_{st}, \tag{4.28}$$

unde: D_{id} este diametrul interior al tubului.

După determinarea diametrului exterior al spiralei, se determină diametrul dornului de spiralizare cu ajutorul diagramei din fig. 4.12 care ține seama de creșterea diametrului spiralei, datorită arcuirii sîrmei după procesul de înfășurare. În cazul în care, în practică, nu există dornul rezultat din diagramă atunci se adoptă dornul cel mai apropiat, după care se scoate din aceeași diagramă diametrul exterior real al spiralei sîrmei de rezistență. În acest caz, diametrul mediu al spiralei va fi:

$$D_{mediu} = D_{ext\ sp} - d. \tag{4.29}$$

Se determină numărul de spire al spiralei cu formula:

$$v = \frac{1}{\pi(D_{ext\ sp} - d)} = \frac{1}{\pi D_{med\ sp}}\, l \tag{4.30}$$

Cantitatea necesară de sîrmă pentru spirală se mărește cu circa 2×20 spire necesare la înfășurarea pe fișele de contact și deci lungimea necesară a sîrmei de rezistență va fi:

$$l_{necesar} = l + 2 \cdot 20 \cdot \pi\, D_{med\ sp} \tag{4.31}$$

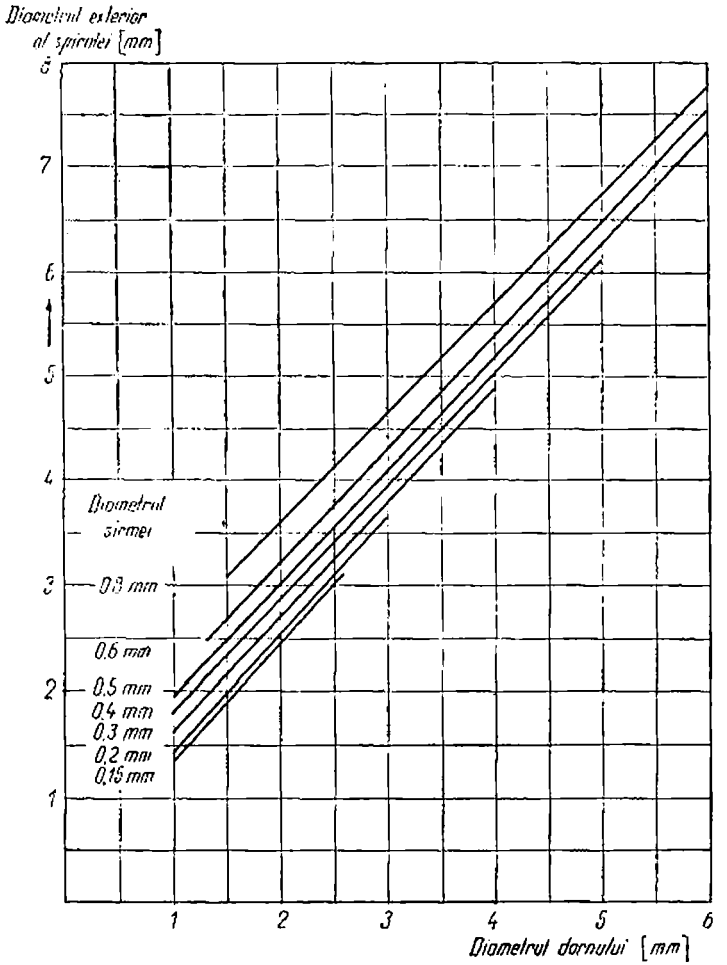


Fig. 4.12. Diametrul dornului de spiralizare în funcţie de diametrul exterior al spiralei şi diametrul sîrmei rezistive.

Pasul spiralei se calculează cu formula:

$$s = \frac{l_{nd}}{v}, \qquad (4.32)$$

după care se stabileşte coeficientul de pas $\frac{s}{d}$.

La stabilirea acestui coeficient este necesar să se reţină că experienţele au arătat că o bună calitate a spiralei se obţine cu un pas:

$$s = (2{,}5—3{,}5)d.$$

Această valoare a pasului asigură pe lîngă distanţa necesară între spire şi posibilitatea ca granulele cu dimensiuni de circa 0,4 mm din materialul izolant să poată intra în interiorul spiralei. Cazul $s > 4$ d nu se recomandă şi se utilizează numai în cazurile în care elementul are puteri specifice reduse.

În cazul unei distanţe prea mici între spirele spiralei înainte de comprimare apare fenomenul de sortare prin circuire după granulaţia materialului izolant, ceea ce are ca urmare scăderea conductivităţii termice.

În vederea uşurării calculului spiralei se pot construi diagramele de calcul din figurile 4.13—4.21, care au fost calculate pentru spirale cu diametrul de 2; 3; 4 mm şi pentru sîrme cu grosime de 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65 şi 0,70 mm, respectiv pentru spiralele celei mai utilizate din sîrmă rezistivă Kanthal tip A, Kanthal tip DSD şi Nikrothal 80.

Din aceste diagrame, în funcţie de raportul $\frac{\Omega}{m}$, (rezistenţa la rece înainte de laminare a elementului încălzitor pe metru lungime activă înainte de laminare) se determină diametrul sîrmei rezistive şi raportul $\frac{s}{d}$ prin ridicarea unei verticale pînă la intersecţia ei cu o dreaptă oblică din interiorul celor două paralele orizontale pe care este trecut diametrul căutat al sîrmei.

Utilizarea diagramei permite alegerea diametrului sîrmei în aşa fel, încît să se respecte valoarea impusă

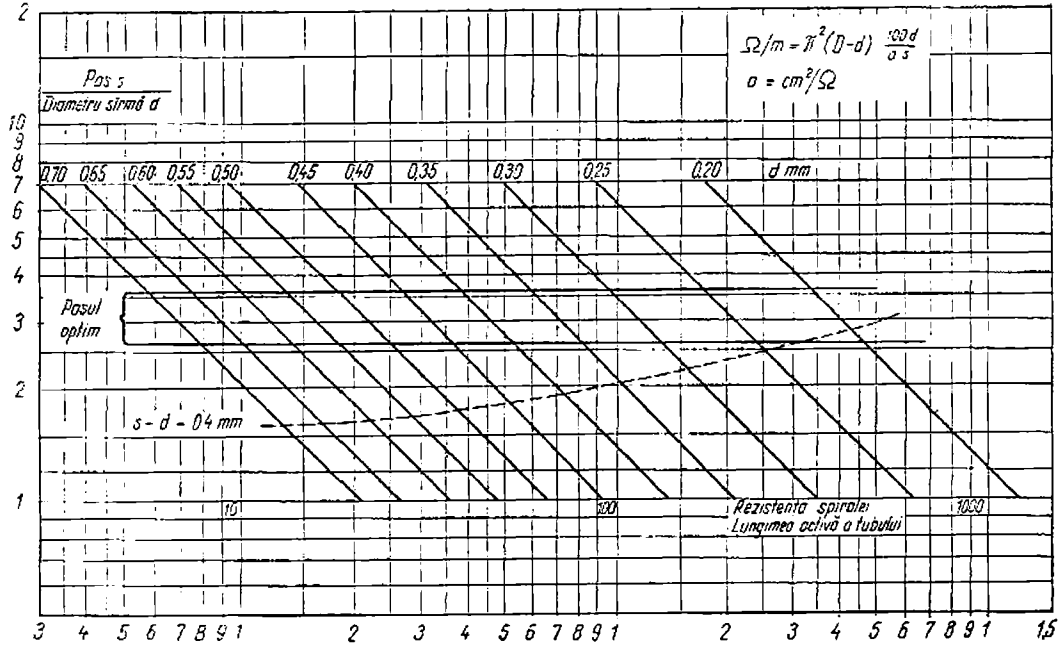

Pas s
Diametru sîrmă d
0,70 0,65 0,60 0,55 0,50 0,45 0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 d mm
Pasul optim
s - d - 0,4 mm
Rezistenta spirale
Lungimea activă a tubului

Fig. 4.13. Diagramă de calcul a diametrului sîrmei rezistive, din Kanthal A cu diametrul spiralei de 2 mm.

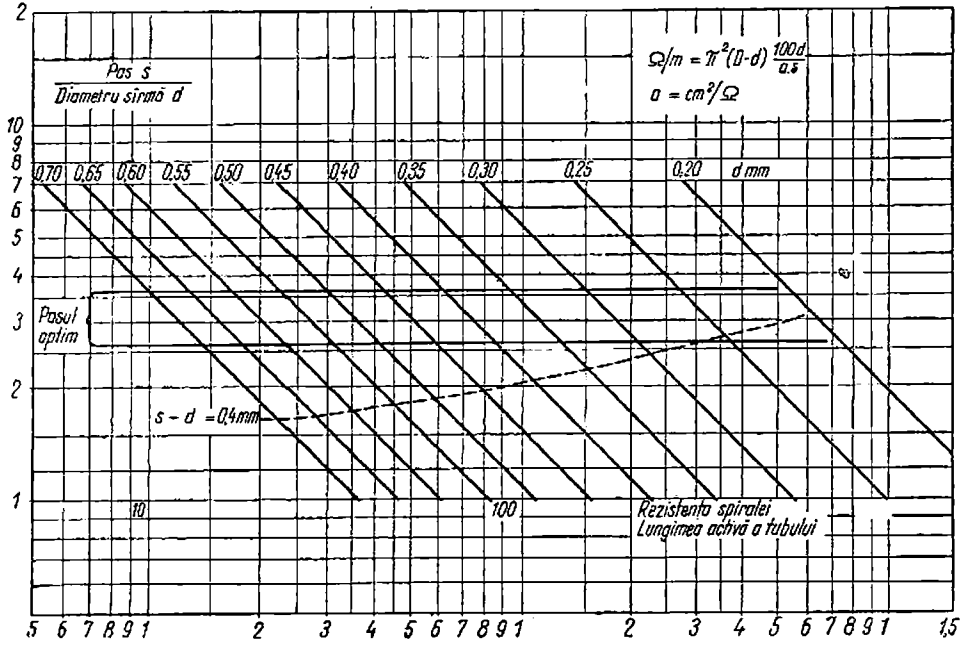

Pas s / Diametru sîrmă d
Ω/m = π²(D-d) 100d/a·s
a = cm²/Ω
0,70 0,65 0,60 0,55 0,50 0,45 0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 d mm
Pasul optim
s - d = 0,4mm
10
100
Rezistența spiralei
Lungimea activă a tubului

Fig. 4.14. Diagramă de calcul a diametrului sîrmei rezistive din Kanthal A cu diametrul spiralei de 3 mm.

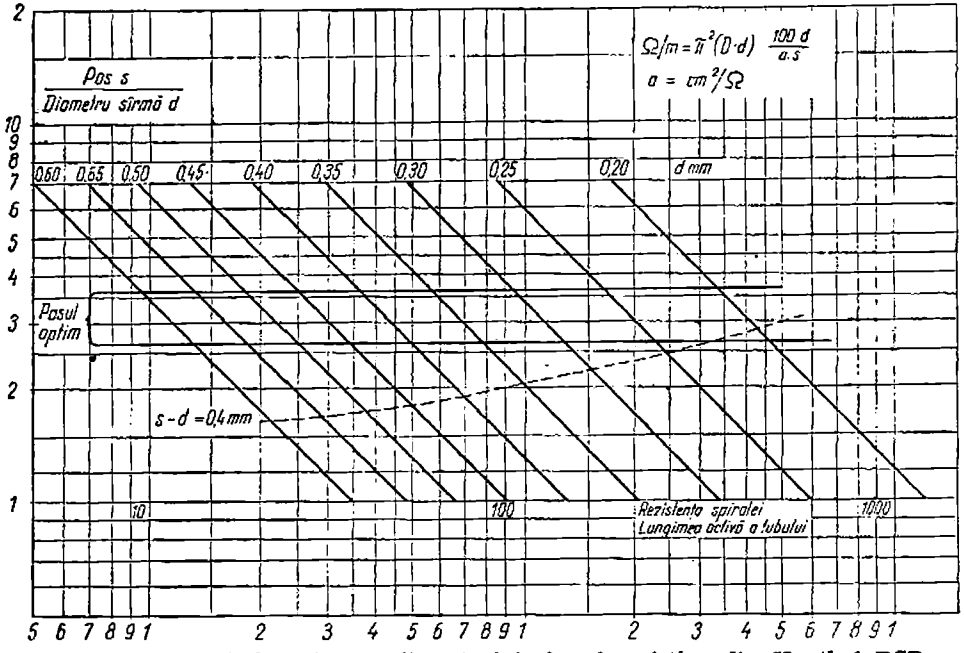

Pas s / Diametru sîrmă d
Ω/m = π²(D-d) 100 d / a.s
a = cm²/Ω
0,60 0,55 0,50 0,45 0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 d mm
Pasul optim
s - d = 0,4 mm
10
100
1000
Rezistența spiralei
Lungimea activă a tubului
2 1 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1

Fig. 4.15. Diagramă de calcul a diametrului sîrmei rezistive din Kanthal DSD cu diametrul spiralei de 2 mm.

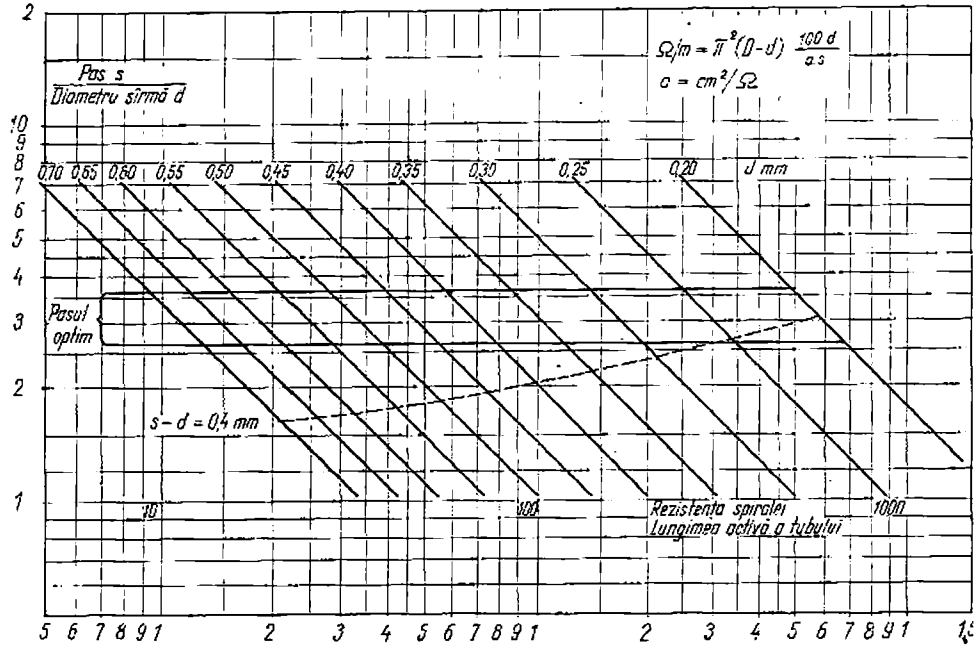


Fig. 4.16. Diagramă de calcul a diametrului sîrmei rezistive din Kanthal DSD cu diametrul spiralei de 3 mm.

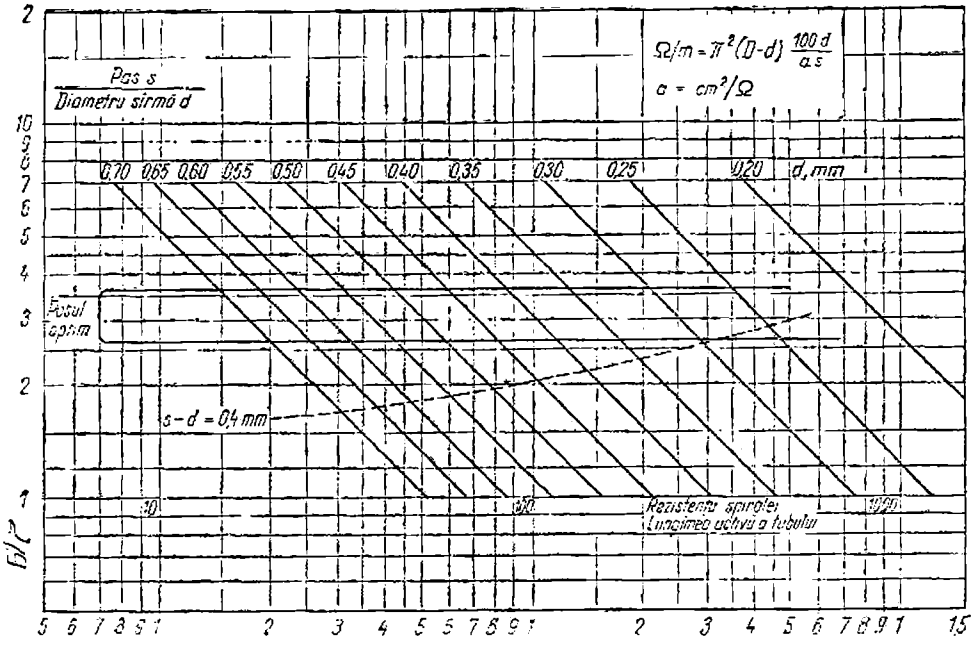

Pas s / Diametru sîrmă d
Ω/m = π²(D-d) 100 d / a s
a = cm²/Ω
0,70 0,65 0,60 0,55 0,50 0,45 0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 d, mm
Focul Capim
s - d = 0,4 mm
Rezistenta spiralei
Lungimea activă a tubului
Ω/m

Fig. 4.17. Diagramă de calcul a diametrului sîrmei rezistive din Kanthal A cu diametrul spiralei de 4 mm.

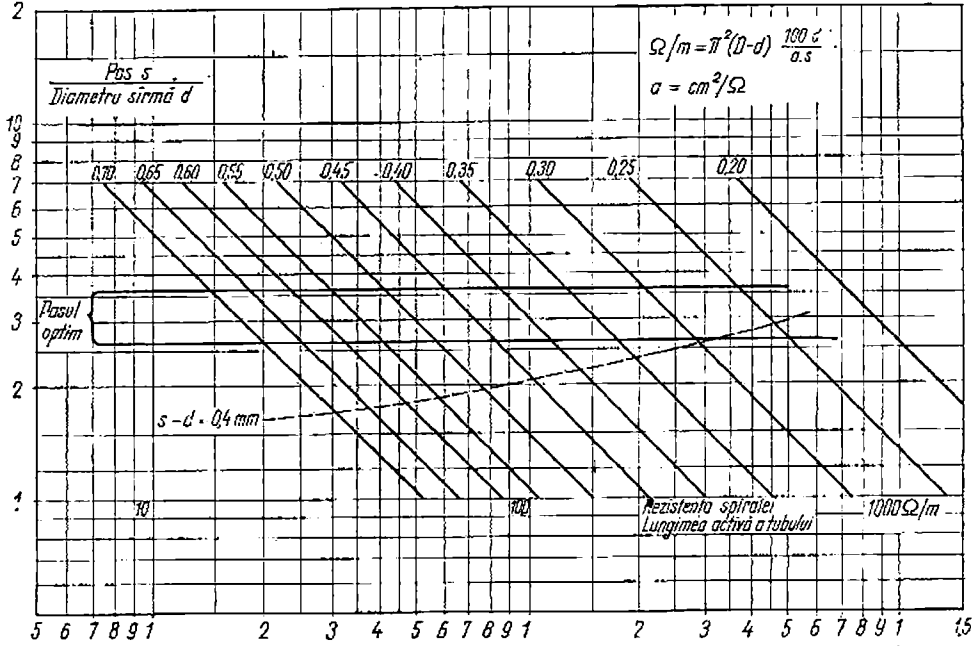

Pas s / Diametru sîrmă d
Ω/m = π²(D-d) 100 c / a.s
a = cm²/Ω
0,70 0,65 0,60 0,55 0,50 0,45 0,40 0,35 0,30 0,25 0,20
Pasul optim
s - d = 0,4 mm
10
100
Rezistența spiralei
Lungimea activă a tubului
1000Ω/m

Fig. 4.18. Diagramă de calcul a diametrului sîrmei rezistive din Kanthal DSD cu diametrul spiralei de 4 mm.

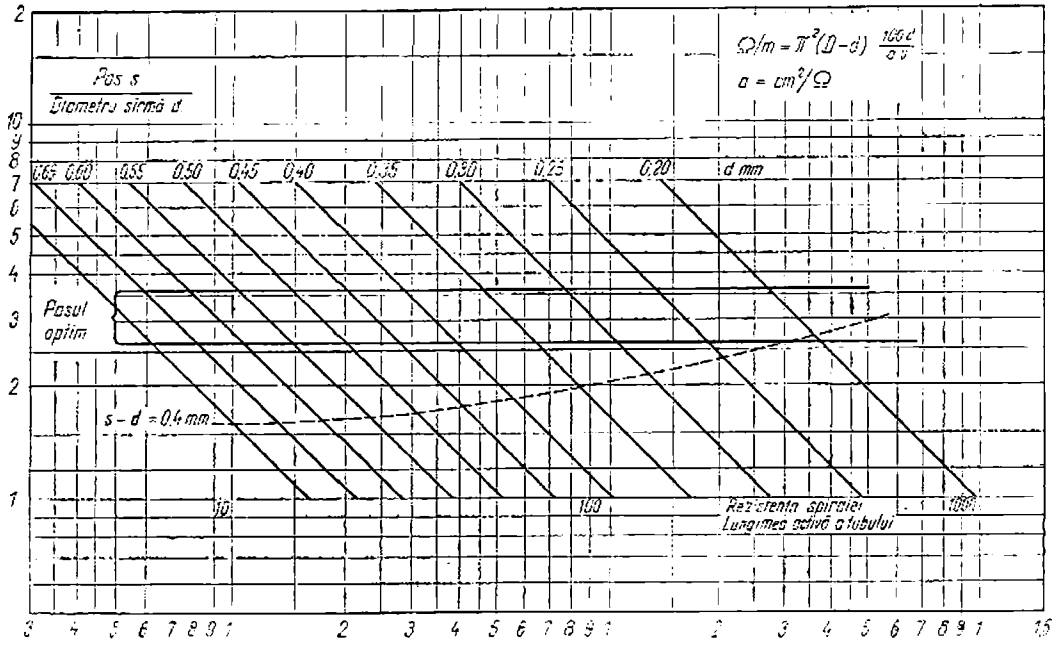

Pas s / Diametru sîrmă d
Ω/m = π²(D−d) 100d / a v
a = cm²/Ω
0,65 0,60 0,55 0,50 0,45 0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 d mm
Pasul optim
s − d = 0,4 mm
10
100
Rezistenta spiralei
Lungimea sectiei a tubului

Fig. 4.19. Diagramă de calcul a diametrului sîrmei rezistive din Nikrothal 80 cu diametrul spiralei de 2 mm.

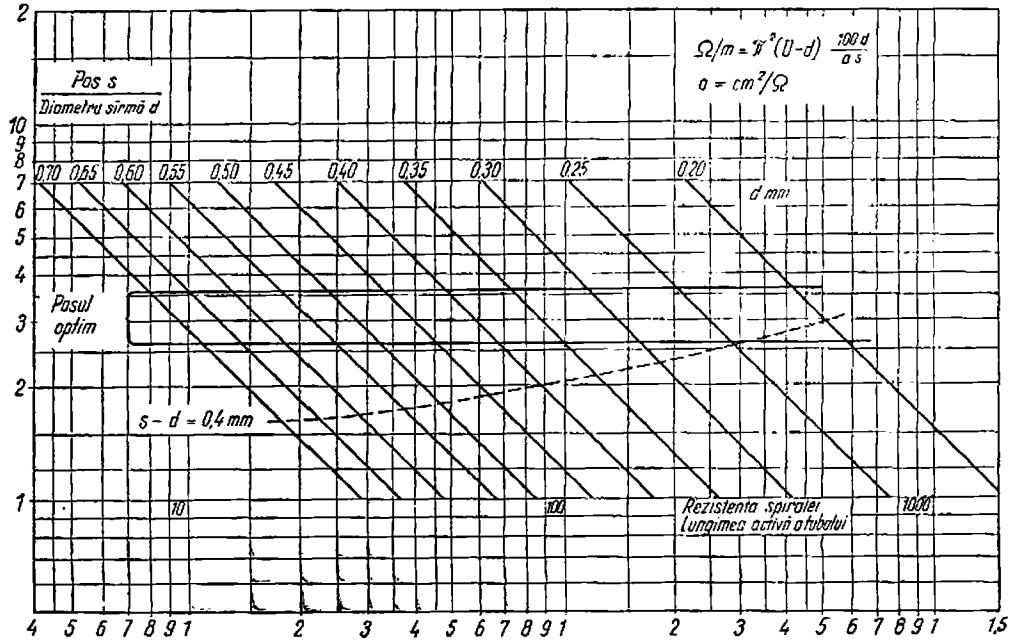


Fig. 4.20. Diagramă de calcul a diametrului sîrmei rezistive din Nikrothal 80 cu diametrul spiralei de 3 mm.

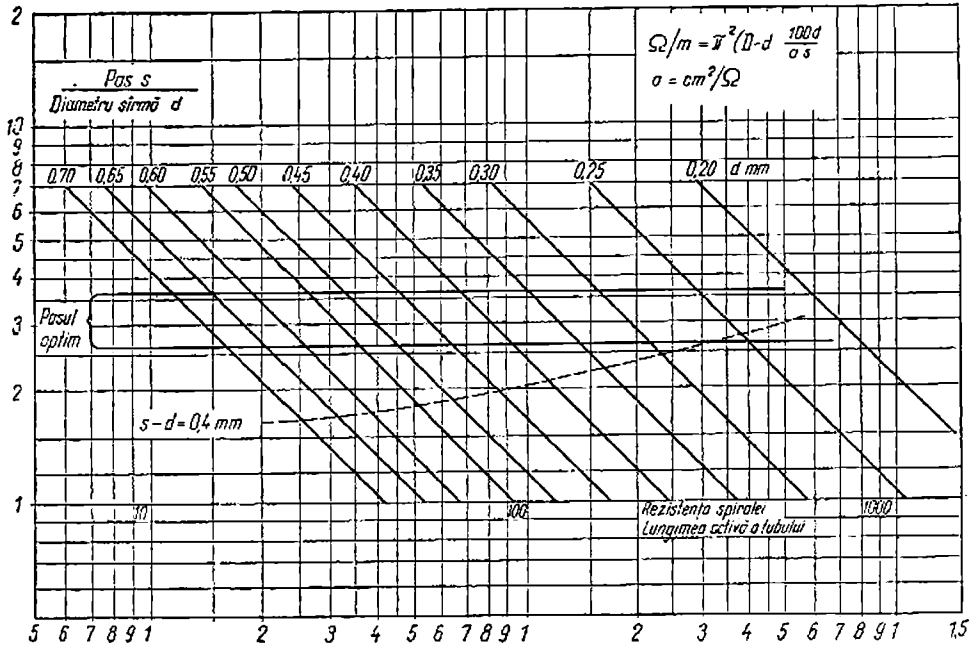

Pas s / Diametru sîrmă d
Ω/m = π²(D-d) 100d / σ s
σ = cm²/Ω
0,70 0,65 0,60 0,55 0,50 0,45 0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 d mm
Pasul optim
s-d=0,4 mm
Rezistența spiralei
Lungimea activă a tubului
10
90
1000
2 3 4 5 6 7 8 9 10 15

Fig. 4.21. Diagramă de calcul a diametrului sîrmei rezistive din Nikrothal 80 cu diametrul spiralei de 4 mm.

optimă a valorii lui $\frac{s}{d}$. În acest mod se elimină posibilitatea stabilirii acestei valori prin determinări succesive.

Avînd metodologia stabilită pentru determinarea dimensiunilor constructive ale elementului încălzitor se poate trece la determinarea, respectiv verificarea temperaturii sîrmei de rezistență și a materialului izolant.

Determinarea temperaturii sîrmei de rezistență cu ajutorul termocuplelor nu este întotdeauna accesibilă și concludentă, motiv pentru care s-au elaborat formule matematice și au fost construite diagrame ca urmare a analizei procesului termic care se petrece în interiorul elementului încălzitor în tub.

Se poate stabili că:

$$t_{sp}=t_t+\Delta t, \tag{4.33}$$

unde: t_{sp} este temperatura sîrmei de rezistență;

t_t — temperatura tubului;

Δt — căderea de temperatură de la spirală la tub.

Temperatura t_t se determină pentru condițiile de lucru impuse pe baza tabelelor și diagramelor tratate anterior.

Pentru determinarea lui Δt sînt indicate două metode:

— metoda analitică preluată din documentațiile firmei suedeze Bulten-Kanthal (firmă cu renume mondial în construcția materialelor și utilajelor pentru construcția elementelor încălzitoare în tub);

— metoda grafică dată de C. R. Mindin.

Ambele metode au la bază formula transmiterii de căldură a două tuburi concentrice; în cazul de față tubul interior considerîndu-se chiar spirala de încălzire, ceea ce impune adoptarea unui coeficient de corecție.

În cazul metodei analitice, Δ_t este dat de formula:

$$\Delta t=\frac{k\cdot p\cdot D_{că}}{2\lambda}\cdot\ln\frac{D_{tt}}{D_{ext\ sp}}, \tag{4.34}$$

unde: k este coeficientul care ține seama de diferența geometrică între spirala de încălzire și

tub. Valoarea acestuia este dată de diagrama din fig. 4.22 în funcţie de raportul pasului spiralei şi diametrul sîrmei de rezistenţă;

p — puterea specifică a tubului elementului încălzitor, în W/cm²;

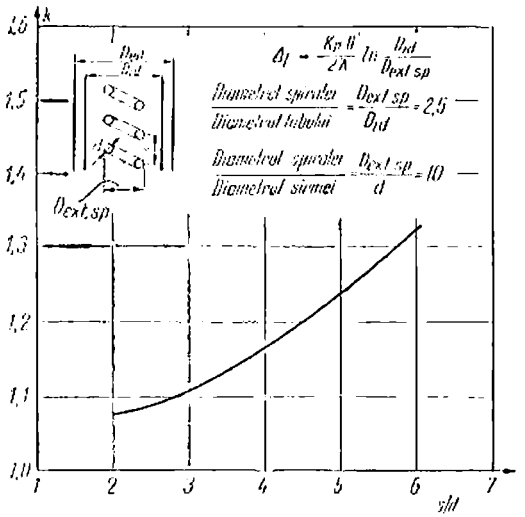


Fig. 4.22. Coeficientul K în funcţie de coeficientul de pas.

$D_{ext\ sp}$ — diametrul exterior al spiralei de încălzire, în cm;

D_{td} — diametrul interior al tubului, în cm;

D_{ed} — diametrul exterior al tubului, în cm;

λ — conductivitatea termică a materialului izolant, în W/cm·°C.

Prin metoda grafică, căderea de temperatură de la spirală la tub se determină calculînd valoarea raportului $\frac{\Delta t}{q_l}$ în care q_l este fluxul termic de la tub la mediul înconjurător de încălzit şi are valoarea:

$$q_l = \frac{0{,}86 \cdot P}{L_{ad}} \quad [\text{Kcal/cm·h}], \qquad (4.35)$$

unde: P este puterea elementului încălzitor în tub, în W;

0,86 — echivalentul caloric al curentului electric;

L_{ad} — lungimea activă a tubului, în cm.

Valoarea raportului:

$$\frac{\Delta t}{ql}$$

se scoate din nomograma din fig. 4.23 (după C. R. Mindin) în funcție de: x, y, z, k și λ, unde:

$$x=\frac{d}{D_{id}}; \quad y=\frac{d}{D_m}; \quad z=\frac{D_{id}}{d_m}; \quad k=\frac{s}{d},$$

în care: d este diametrul sîrmei de rezistență;

D_m — diametrul mediu al spiralei;

s — pasul spiralei;

Modul de lucru pentru determinarea raportului $\frac{\Delta t}{q_l}$ este următorul:

— Pe scara mărimilor lui x se caută valoarea calculată, de unde se ridică o perpendiculară pînă la intersecția acesteia cu dreapta oblică corespunzătoare valorii calculate lui k. Din acest punct de intersecție se trage o linie orizontală pînă la dreapta corespunzătoare valorii lui y din fasciculul de drepte, de unde se coboară cu o verticală, pînă la intersecția cu dreapta oblică corespunzătoare valorii calculate pentru z, de unde cu o linie orizontală se trece pînă la linia oblică corespunzătoare materialului izolant cu conductivitatea termică respectivă. De la acest punct de intersecție se coboară o verticală pînă la scara valorilor lui $\frac{\Delta t}{q_l}$ pe care se citește valoarea căutată.

După stabilirea temperaturilor de funcționare ale tubului și sîrmei de rezistență se poate trece la determinarea temperaturii pentru materialul izolant.

Temperatura medie a materialului izolant se determină prin media aritmetică a temperaturii spiralei de încălzire și a tubului, respectiv:

$$t_{iz}=\frac{t_{sp}+t_t}{2}. \qquad (4.36)$$

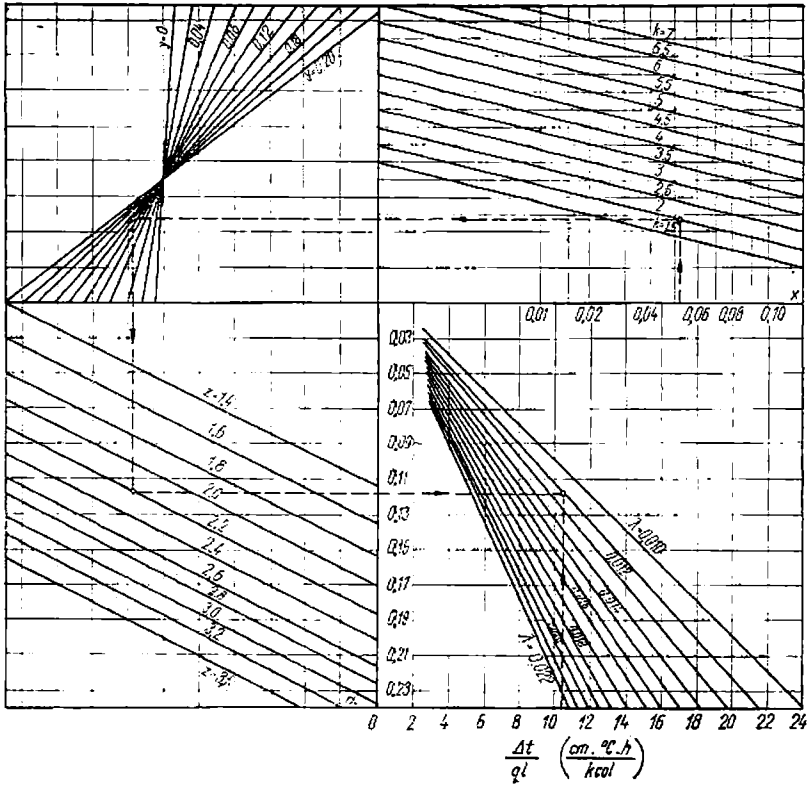


Fig. 4.23. Nomogramă pentru determinarea căderii de temperatură între spirală și tub.

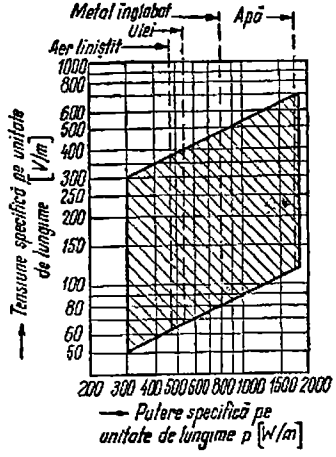

Metal înglobat
Aer liniștit
Apă
Tensiune specifică pe unitate de lungime [V/m]
200 300 400 500 600 800 1000 1500 2000
Putere specifică pe unitate de lungime p [W/m]

Fig. 4.24. ↑ Determinarea lungimii active a elementului încălzitor pentru o putere dată.

În practica adoptării și dimensionării sistemelor de încălzire electrice, deseori se pune problema puterii ce se poate realiza cu un element încălzitor în tub avînd o lungime de tub dată sau invers: care trebuie să fie lungimea tubului pentru o putere dată. Răspunsul îl dă diagrama din fig. 4.24 care ne arată că pot fi realizate toate elementele încălzitoare, ale căror linii trasate din punctele de tensiune specifică pe unitate de lungime (V/m) și putere specifică pe unitate de lungime (W/m) se intersectează în interiorul cîmpului haşurat.

Se va observa că în diagramă sînt date linii de limită pentru încărcarea elementelor încălzitoare în tub în diverse medii de funcționare. În cele ce urmează se vor da cîteva exemple practice de folosire a diagramei.

Exemplul I.

Se cere care este puterea unui element încălzitor necesar încălzirii apei și a cărui lungime activă este de $L_a = 1\,150$ mm?

Se citește în diagrama din fig. 4.24 valoarea maximă pentru puterea specifică pe unitate de lungime care este de 1 750 W/m și deci puterea care poate fi realizată pentru o lungime de tub de 1 150 mm va fi de:

$$P = 1\,750 \cdot 1{,}15 \text{ m} = 2\,000 \text{ W}.$$

Exemplul II

a. Se cere să se determine dacă rezistența în tub în exemplul precedent poate fi executată pentru tensiunea de 220 V.

Tensiunea specifică pe unități de lungime este de:

$$220 : 1{,}15 = 191 \text{ V/m}.$$

Punctul de intersecție a ordonatei de 191 V/m cu abcisa la 1 750 W/m cade în interiorul cîmpului haşurat, deci rezistența în tub poate fi executată pentru tensiunea de 220 V.

b. Se va verifica dacă elementul încălzitor precedent este executabil pentru tensiunea de 110 V.

Tensiunea specifică pe unitate de lungime este de:

$$110 : 1{,}15 = 95 \text{ V/m}.$$

Punctul de intersecție al ordonatei la 96 V/m cu abcisa la 1 750 V/m cade în afara cîmpului haşurat, deci această rezistență nu se poate executa.

Exemplul III.

În cele ce urmează, se dă un alt exemplu de calcul avînd cunoscute următoarele date: puterea $P = 1\,000$ W; tensiunea $U = 220$ V; condiții de lucru: aer liniștit; țeavă disponibilă: Ni-

krothal N2R cu 20% Ni și 25% Cr cu temperatura maximă de utilizare de 900°C (v. tabel 3.21). Dimensiunile țevii: $D_{ei}=10$ mm cu grosimea peretelui de 1,0 mm care se reduce prin laminare la 8,0 mm, deci gradul de reducere este de 20% după cum se vede din tabelul 4.1. Din fig. 4.1 se citește pentru valoarea raportului: $\frac{D_{id}}{D_{ed}}=\frac{8,0}{10,0}=0,8$ și pentru densitatea materialului izolant de 2,45 g/cm³ valoarea alungirii tubului de 33%, respectiv coeficientul de alungire $a=1,33$.

Din diagrama din fig. 4.8, pentru 700°C temperatura de utilizare (din motive de siguranță luată sub temperatura maximă), se scoate valoarea puterii specifice care este de 5,6 W/cm².

Calculul tubului

— Suprafața activă a tubului:

$$F=\frac{P}{P}=\frac{1000}{5,6}=178,5 \text{ cm}^2.$$

— Lungimea activă a tubului (după comprimare)

$$L_{ad}=\frac{F}{\pi D_{ed}}=\frac{178,5}{\pi \cdot 0,8}=71,05 \text{ cm}.$$

— Din tabelul 1.2 se alege pentru lungimea știftului de contact valoarea de 75 mm și deci lungimea totală a tubului după comprimare va fi:

$$L_{td}=L_{ad}+2L_b=71,05+15,00=86,05 \text{ cm}.$$

— Lungimea totală înainte de comprimare

$$L_{tb}=\frac{L_{td}}{a}=\frac{86,05}{1,33}=64,7 \text{ cm}.$$

— Lungimea activă înainte de comprimare

$$L_{ab}=\frac{L_{ad}}{a}=\frac{71,05}{1,33}=53,42 \text{ cm}.$$

Calculul spiralei de încălzire.

— Rezistența spiralei de încălzire R_t

$$R_t=\frac{U^2}{P}=\frac{220^2}{1000}=48,4 \ \Omega.$$

— Rezistența la rece a spiralei de încălzire

$$R_{20}=\frac{R_t}{C_t}\cdot$$

Se apreciază că temperatura spiralei va fi de 800°C pentru care, din tabelul 3.8 (pentru sîrma de rezistență tip Kanthal A) se scoate valoarea lui C_t care este de 1,049. Prin înlocuirea valorilor determinate mai sus se obține:

$$R_{20}=\frac{48,4}{1,049}=46,14\ \Omega,$$

— Rezistența la rece a spiralei înainte de comprimare:

$$R^1_{20}=\alpha_r R_{20},$$

unde: α_r se calculează cu formula (4.13):

$$\alpha_r=\frac{D^2_{ei}}{1,04^2\cdot D^2_{ed}}=\frac{10^2}{1,04^2\cdot 8^2}=1,44,$$

deci:

$$R^1_{20}=1,44\cdot 46,14=66,44.$$

Admițînd o putere specifică a sîrmei de rezistență de $p_{sp}=20$ W/cm^2, valoare care va fi considerată corespunzătoare dacă temperatura sîrmei de rezistență calculată nu depășește valoarea maximă admisă pentru sîrma Kanthal A care este de 1 330°C, se calculează suprafața spiralei de încălzire:

$$S_{sp}=\frac{P}{P_{sp}}=\frac{1000}{20}=50,00\ \text{cm}^2.$$

— Se calculează pentru spirală valoarea raportului

$$\frac{\text{cm}^2}{\Omega}=\frac{50,00}{66,44}=0,75.$$

Din tabelul 3.8, pentru această valoare, se scoate diametrul cel mai apropiat al sîrmei care este $d=0,33$ mm, cu o rezistență liniară $r=14,45\ \frac{\Omega}{\text{m}}$.

— Se calculează lungimea sîrmei de rezistență

$$l=\frac{R^1_{20}}{r}=\frac{66,44}{14,45}=4,59\ \text{m}.$$

— Se alege pentru grosimea stratului de izolare valoarea $q_{st}=1{,}5$ mm, situație în care diametrul exterior al spiralei va fi:

$$D_{ext\ sp}=D_{id}-2q_{st}=6{,}00-2\cdot 1{,}5=3{,}00 \text{ mm.}$$

— Diametrul mediu al spiralei:

$$D_{mediu}=D_{ext\ sp}-d=3{,}00-0{,}35=2{,}65 \text{ mm.}$$

— Lungimea sîrmei de rezistență necesară se calculează, luînd în considerare observația că pe cele două fișe de contact se înfășoară 2×20 spire:

$$l_{necesar}=1+2\cdot 20=4\,590+2\cdot 20\cdot\pi\cdot D_{med\ sp}=$$

$$=4\,590+2\cdot 20\cdot\pi\cdot 2{,}65=4\,923 \text{ mm.}$$

— Diametrul dornului de spiralizare se scoate din fig. 4.12:

$$D_{dorn}=2{,}2 \text{ mm.}$$

— Numărul de spire al spiralei:

$$v=\frac{1}{\pi(D_{ext\ sp}-D)}=\frac{4590}{\pi(3-0{,}35)}=\frac{4590}{8{,}32}=551 \text{ spire.}$$

— Pasul spiralei:

$$s=\frac{L_{ad}}{v}=\frac{710{,}5}{551}=1{,}29;$$

$$\frac{s}{d}=\frac{1{,}29}{0{,}35}=3{,}68,$$

valoare care corespunde cu limitele optime impuse.

După cum s-a arătat anterior, pentru stabilirea diametrului sîrmei de rezistență la un coeficient de pas optim între 2,5 și 3,5 se pot utiliza diagramele din figurile 4.13—4.21.

Pentru exemplul nostru se va folosi diagrama din fig. 4.14. Se calculează valoarea

$$\frac{R\frac{1}{20}}{L_{ai}}=\frac{66{,}44}{0{,}5342}=124{,}3.$$

În diagrama 4.14, cu valoarea corespunzătoare de 124,3, pe abscisă se ridică o verticala pînă la intersecția cu linia dreaptă oblică din interiorul celor două paralele pe care este scris diametrul sîrmei de 0,35 mm și coeficientul de pas $\frac{s}{d}=2{,}75$.

Diferența față de valoarea calculată provine din faptul că diagrama a fost construită pentru diametrul spiralei de 2 mm, pe cînd în exemplul nostru acesta este de 2,65 mm.

Pentru determinarea căderii de temperatură între spirală și tub se vor aplica cele două metode tratate, adică cea analitică și cea grafică.

Căderea de temperatură calculată analitic

$$\Delta t = \frac{k \cdot p \cdot D_{eă}}{2\lambda} \ln \frac{D_{tă}}{D_{ext\ sp}},$$

în care: valoarea lui k pentru $\frac{s}{d} = 3{,}68$ se scoate din diagrama 4.22, respectiv $k = 1{,}15$, și prin înlocuire

$$\Delta t = \frac{1{,}15 \cdot 5{,}6 \cdot 0{,}80}{2 \cdot 0{,}02} \ln \frac{6}{3} = \frac{5{,}15}{0{,}04} \ln 2{,}0 = 128{,}75 \cdot 0{,}693 = 89{,}22°C.$$

Căderea de temperatură calculată grafic

— Se calculează valorile lui x, y, z și k:

$$x = \frac{d}{D_{tă}} = \frac{0{,}35}{6{,}00} = 0{,}058,$$

$$y = \frac{d}{D_m} = \frac{0{,}35}{2{,}65} = 0{,}132,$$

$$z = \frac{D_{tă}}{D_m} = \frac{6{,}00}{2{,}65} = 2{,}264,$$

$$k = \frac{s}{d} = \frac{1{,}29}{0{,}35} = 3{,}68.$$

Din diagrama fig. 4.23 se scoate valoarea

$$\frac{\Delta_l}{q_l} = 7{,}00.$$

Cu ajutorul formulei (4.35) se calculează valoarea lui ql.

$$q_l = \frac{0{,}86 \cdot P}{L_{aă}} = \frac{0{,}86 \cdot 1\,000}{71{,}05} = \frac{860}{71{,}05} = 12{,}10.$$

După înlocuire se obține:

$$\Delta t = 7{,}00 \cdot 12 \cdot 10 = 84{,}7°C.$$

Deci valorile obținute prin cele două metode sînt sensibil egale.

Folosind formula:

$$t_{sp}=t_i+t,$$

în care s-a considerat $t_i=700°C$ se calculează

$$t_{sp}=700{,}00+89{,}22=789{,}22°C,$$

care este o valoare admisă pentru sîrma de rezistență tip Kanthal A. În continuare, se va calcula temperatura stratului izolant t_{iz} cu formula (4.36) în care prin înlocuire devine

$$t_{iz}=\frac{t_{sp}+t_i}{2}=\frac{789{,}22+700}{2}=744{,}6°C,$$

valoare de asemenea admisă.

În cele ce urmează se va analiza prin exemple practice influența factorilor din formula Δt asupra căderii de temperatură, luînd ca bază de comparație exemplul calculat anterior.

Influența conductivității termice a materialului izolant.

În cazul în care în locul oxidului de magneziu cu valoarea $\lambda=0{,}02$ W/cm°C, din exemplul anterior se va folosi nisip cvartos cu $\lambda=0{,}012$ W/cm°C. În acest caz căderea de temperatură va fi:

$$\Delta t=\frac{1{,}15\cdot 5{,}6\cdot 0{,}80}{2\cdot 0{,}012}\cdot \ln\frac{6}{3}=214{,}5\cdot 0{,}693=148{,}6.$$

Diferența de temperatură între spirala în tub va fi cu 59,42°C mai mare decît în cazul folosirii oxidului de magneziu (148,64—89,22=59,42°C).

În acest caz temperatura spiralei va fi:

$$t_{sp}=t_i+t=700+148{,}6=848{,}6°C,$$

ceea ce arată că folosirea unui material cu o conductivitate mai mică conduce la o creștere importantă a temperaturii.

Influența măririi diametrului exterior al spiralei respectiv reducerea grosimii stratului izolant între spirală și tub.

Pentru exemplificare se va reduce grosimea stratului izolant de la 1,5 mm la 1 mm (limita inferioară). Diametrul exterior al spiralei în acest caz va fi:

$$D_{ext\,sp}=D_{id}-2\cdot l=6{,}0-2=4{,}0 \text{ mm};$$

$$D_{med\,sp}=D_{ext\,sp}-d=4{,}0-0{,}35=3{,}65 \text{ mm}.$$

Numărul de spire:

$$v=\frac{1}{\pi(D_{ext\,sp}-d_{sirmă})}=\frac{4590}{\pi\cdot 3{,}65}=\frac{4590}{11{,}46}=400 \text{ spire},$$

Pasul va fi:

$$s = \frac{L_{ad}}{p} = \frac{710,5}{400} = 1,77,$$

$$\frac{s}{d} = \frac{1,77}{0,35} = 5,05;$$

$$\Delta t = \frac{1,24 \cdot 5,60 \cdot 0,80}{2 \cdot 0,02} \ln \frac{6}{4} = 138,7 \cdot 0,27 = 37,44.$$

Deci, după cum se observă, căderea de temperatură este mai mică cu 51,78°C (89,22—37,44=51,78°C), iar temperatura spiralei de încălzire va avea valoarea de

$$t_{sp} = 700,00 + 37,44 = 737,44°C.$$

Pentru obținerea unor parametri optimi se recomandă ca diametrul spiralei să fie cît mai mare, respectiv grosimea stratului izolant să fie cît mai mică, ținînd desigur seama de condiția ca această grosime să nu coboare sub 1 mm.

4.4. Calculul rezistenței minime de izolare

Prescripțiile și normele existente în diferite țări privind curenții de scurgere maxim admiși fixează anumite limite pentru dimensiunile și încărcarea electrică în construcția elementelor încălzitor în tub.

Conform normelor internaționale CEE, în cele mai multe cazuri, curenții de scurgere nu pot să depășească 0,75 mA/kW la o încercare de 1,24 ori puterea nominală și respectiv 1,12 ori tensiunea nominală. În ceea ce urmează se va indica modul de calcul a rezistenței de izolație a elementului încălzitor considerîndu-se ca fiind cunoscute următoarele date: U_n — tensiunea nominală; P_n — puterea nominală; I — curenții de scurgere la 1,12 U_n; D_{ecl} — diametrul exterior al tubului; L_{ad} — lungimea activă a elementului încălzitor; p_n — puterea specifică a tubului la puterea nominală. Cu aceste date se calculează rezistența de izolație folosind formula:

$$R_{iz} = \frac{1,12 \cdot U_n}{I}$$

Împărțind prin $P_n R_{iz}$ se obține:

$$\frac{I}{P_n} = \frac{1{,}12 \cdot U_n}{P_n \cdot R_{iz}}$$

unde:

$$P_n = \pi \cdot p_n \cdot D_{cd} \cdot L_{ad}$$

$$\frac{I}{P_n} = \frac{1{,}12 \cdot U_n}{\pi \cdot p_n \cdot D_{cd} \cdot L_{ad} \cdot R_{iz}}$$

Notînd raportul $\frac{I}{P_n} = Z$ și cunoscînd că nu poate fi mai mare decît 0,75 mA/kW, formula devine:

$$R_{iz} = \frac{0{,}36 \cdot U_n}{p_n \cdot D_{cd} \cdot L_{ad} \cdot Z} \qquad (4.37)$$

Exemplu:

Sînt cunoscute la un element încălzitor în tub:

$U_n = 220$ V

$D_{cd} = 0{,}8$ cm

$L_{ad} = 100$ cm

$p_n = 5$ W/cm^2

$$R_{iz} = \frac{0{,}36 \cdot 220}{0{,}8 \cdot 100 \cdot 5 \cdot 0{,}75} = 0{,}26 \text{ MΩ}.$$

Deci rezistența de izolație efectivă măsurată nu poate să scadă sub valoarea de 0,26 MΩ.

5. Tehnologia de fabricaţie a elementelor încălzitoare electrice în tub

Calitatea elementelor încălzitoare este mult influenţată de respectarea riguroasă a tehnologiei de fabricaţie prescrise şi de condiţiile de microclimat ale locului de muncă. O execuţie necorespunzătoare a spiralei de încălzire sau realizarea umplerii şi închiderii tubului într-o încăpere în a cărei atmosferă se găsesc particule metalice şi cu umiditate peste 60% pot conduce la rebutarea întregului lot aflat în fabricaţie.

Operaţiile tehnologice de fabricaţie ale elementelor încălzitoare în tub pot fi grupate astfel:

— operaţiile de pregătire ale tubului;

— pregătirea subansamblului spirală de încălzire şi introducerea ei în tub;

— umplerea tubului cu praf izolant pe o maşină de umplut tuburi (tip Kanthal etc.);

— comprimarea tubului (prin laminare etc.);

— recoacerea;

— fasonarea;

— închiderea capetelor.

Operaţiile de pregătirea tubului constau în:

— debitarea pe maşini unelte universale şi debavurarea capetelor; aceasta trebuie să se facă atît pe muchiile interioare cît şi pe cele exterioare, deoarece în cazul unei debavurări necorespunzătoare pot ajunge în tub cu ocazia umplerii împreună cu materialul izolant

particule de metal care inevitabil conduc la scurtcircuit între spirala de încălzire şi tub;

— curăţirea tubului de care depinde scăderea rezistenţei de izolare a materialului izolant. Ea constă în sablarea tuburilor pentru îndepărtarea corpurilor solide şi degresarea în solvenţi de tricloretilenă în cazul suprafeţelor murdărite de ulei, sau prin încălzirea tubului la temperaturi nu prea ridicate pentru arderea impurităţilor. După curăţire acestea trebuie şterse la interior, aşezate în poziţie verticală pentru scurgerea dizolvantului şi depozitarea lor în încăperi lipsite de umezeală, în vederea evitării condensului.

La executarea spiralei de încălzire, uniformitatea diametrului şi pasului precum şi respectarea anumitor proporţii între dimensiunile ei au o influenţă deosebită asupra calităţii elementului încălzitor în tub. În acest sens, trebuie respectate anumite condiţii şi anume:

— la executarea operaţiei de spiralizare, forţa de întindere a sîrmei rezistive trebuie menţinută la o valoare constantă, orice variaţie a acesteia avînd ca urmare neuniformitatea diametrului şi pasului spiralei; acestea apar îndeosebi la pornirea spiralizării precum şi la frînarea şi la vibraţiile dornului de spiralizare;

— unghiul format de sîrma de rezistenţă cu dornul de spiralizare trebuie să fie menţinut, pe cît posibil constant, astfel încît între spire să existe distanţe egale.

— raportul între diametrul exterior al spiralei $D_{ext\ sp}$ şi diametrul sîrmei d să fie pe cît posibil între următoarele limite:

pentru $d > 1$ mm, $\frac{D_{ext\ sp}}{d} = 5—7$;

pentru $d < 1$ mm, $\frac{D_{ext\ sp}}{d} = 4—10$.

— să fie respectată pe cît posibil relaţia

$$s \geqslant 2d.$$

Nerespectarea condiţiilor impuse de mai sus conduce la realizarea unei spirale cu pas neuniform şi ca urmare la o repartiţie neuniformă a căldurii respective la supraîncălzirea şi în final la arderea ei.

La stabilirea diametrului dornului trebuie să se țină seamă de faptul că după încetarea acțiunii forței de întindere diametrul spiralei crește (vezi fig. 4.12).

Executarea spiralei de încălzire a elementului încălzitor se face prin înfășurarea sîrmei rezistive pe un dorn care este pus în mișcare de rotație de către un motor electric. În funcție de seria de fabricație, operațiile legate de executarea spiralelor sînt mai mult sau mai puțin mecanizate. În producția de masă fabricația se face pe mașini automate. La executarea spiralelor în serie mică se poate folosi o mașină de găurit portativă fixată în poziție orizontală de o menghină paralelă la care dornul de spiralizare și capătul sîrmei este prins în bacurile mandrinei mașinii de găurit de unde începe operația de spiralizare. Conducerea sîrmei se face prin

Fig. 5.1. Spiralizarea pe strung paralel.

dispozitive sau manual, situație în care mîna este protejată printr-o bucată de piele sau stofă. Spiralizarea poate fi executată pe același principiu și pe un strung paralel după cum este arătat în fig. 5.1 sau pe o mașină specială conform fig. 5.2.

La serii mai mari, se utilizează mașini speciale de spiralizare, la care dornul este antrenat direct de un electromotor (dacă turația dornului nu depășește 3 000 rot/min) prevăzut cu frînă electromagnetică. Conducerea firului se face printr-un dispozitiv cu avans automat, după ce în prealabil a fost trecut pe o rolă liberă ce transmite mișcarea de rotație la un contor de metrare care măsoară lungimea de spiră prestabilită. Dornurile lungi și subțiri sînt trase în sens axial de dispozitive de întindere cu arc sau cu contragreutate.

Pentru producția de spirale în serie mare, sînt folosite mașini de spiralizare complet automate care execută spirala fără sfîrșit, fiind reglată și pentru debitarea automată a acestora la lungimea dorită. Operația are loc pe un dorn scurt conic cu mișcare de rotație, spi-

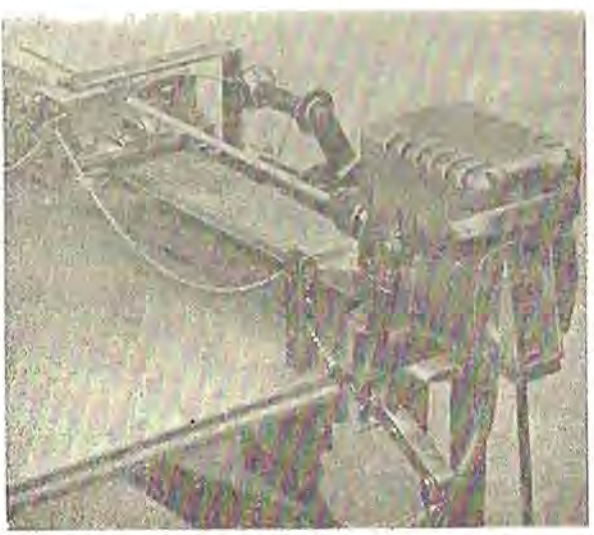


Fig. 5.2 Spiralizarea pe mașini speciale.

rala formîndu-se între una sau două role din cauciuc dur sau masă plastică, care prin aşezarea lor acţionează asupra sîrmei. Dornurile de spiralizare cele mai des uti-

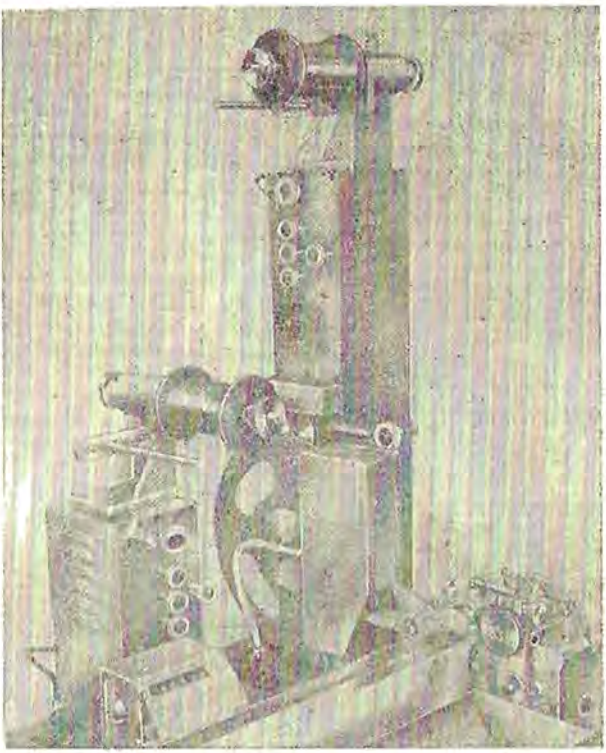


Fig. 5.3. Maşină automată de spiralizat tip Kanthal.

lizate la aceste maşini au diametre cuprinse între 1,2 şi 2,2 mm din 0,2 în 0,2 mm. Maşina poate fi reglată pentru a executa spirală cu spiră lungă, spire îndesate sau cu un anumit pas, şi de asemenea, execută în mod automat şi spirale cu pasuri diferite. Cele mai utilizate maşini pentru acest scop sînt cele de tip Kanthal (Suedia) — fig. 5.3.

Pentru asigurarea pasului corespunzător, la spiralele cu spire îndesate este necesar ca acestea să se întindă la cald, la o lungime de 2 pînă la 3 ori lungimea inițială. În vederea acestui lucru, spiralele se leagă în paralel într-un dispozitiv unde se întind mai întîi la rece, pentru evitarea unui scurtcircuit între spire, după care se leagă la rețea și se încălzesc pînă la temperatura de 200—250°C la o încărcare specifică pe suprafața sîrmei de 5—10 W/cm², după care se întind pînă la lungimea necesară. În timpul executării operației de încălzire se va avea în vedere poziția orizontală a spiralei și obținerea unei temperaturi uniforme, respectiv se va evita producerea de curenți locali sau alte cauze locale care pot produce o întindere finală neuniformă. Deoarece la spiralele lungi porțiunile de la capete se întind mai mult decît mijlocul, se recomandă ca spiralele să fie așezate pe un postament din material refractor și izolator, cu evitarea frecării care ar împiedeca formarea pasului uniform.

Îmbinarea spiralei de încălzire cu fișa de contact. Conectarea la rețea a elementului încălzitor se face prin fișe de contact care sînt fixate pe capetele spiralei de încălzire (fig. 5.4), și anume: fișa *I* superioară și fișa *II* inferioară, cu cap și respectiv dop tehnologic pentru fixarea și rezemarea pe suportul mașinii de umplut. Dimensiunile capului și gîtului fișei sînt date în tabelul 5.1 și sînt executate din bare sau sîrme rotunde de oțel sau în unele cazuri din alamă.

Tabelul 5.1

Dimensiunile fișei de contact I în funcție de dimensiunile spiralei de încălzire

	Diametrul spiralei, mm		
	<2,45	2,45—2,95	<2,95
Diametrul capului, mm	1,25±0,03	1,65±0,03	2,00±0,03
Diametrul gîtului, mm	0,75±0,03	1,10±0,03	1,40±0,03

Condițiile impuse legăturii între spirală și fișa de contact sînt:

— rezistență electrică redusă la trecerea curentului de la fișă la spirala de încălzire;

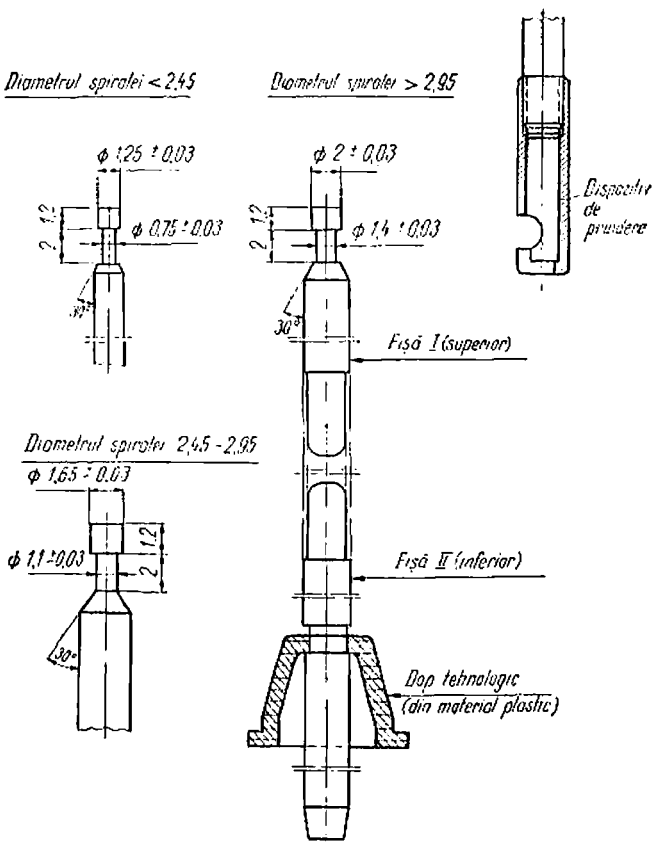
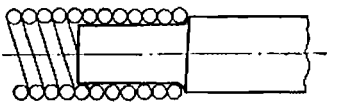


Fig. 5.4. Îmbinarea fișei de contact cu spirala de încălzire.

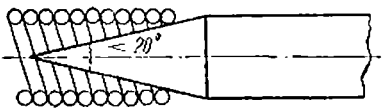
— rezistență mecanică mărită la solicitările ce intervin în procesul de fabricație și în special la faza de comprimare a tubului;

— structura legăturii să poată fi controlată pe cît posibil cu ochiul liber;

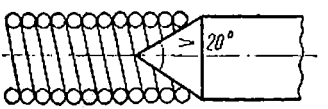
— legătura trebuie să permită o trecere ușoară a țevilor de umplere peste locul îmbinării;



Fișă de contact cu capăt cilindric



Fișă de contact cu capăt conic (conicitate < 20°)



Fișă de contact cu capăt conic (conicitate > 20°)

Fig. 5.5. Fișă de contact cu capăt conic și cilindric.

— legătura să fie realizată cu o productivitate ridicată;

— procedeul aplicat la executarea legăturii să asigure uniformitatea, siguranța și calitatea acesteia.

Condițiilor de mai sus le răspunde cel mai bine procedeul de sudare prin puncte.

În zona de îmbinare fișele de contact au o formă cilindrică sau conică (fig. 5.5). Fișele cilindrice au avantajul că forța de frecare în zona de fixare a spiralei preia o parte din efortul suportat de punctele de sudură. În acest scop, la acestea diametrul fișei se execută cu 0,1 mm mai mare decît cel interior al spiralei, sau se filetează pe porțiunea îmbinării. Ele prezintă însă dez-

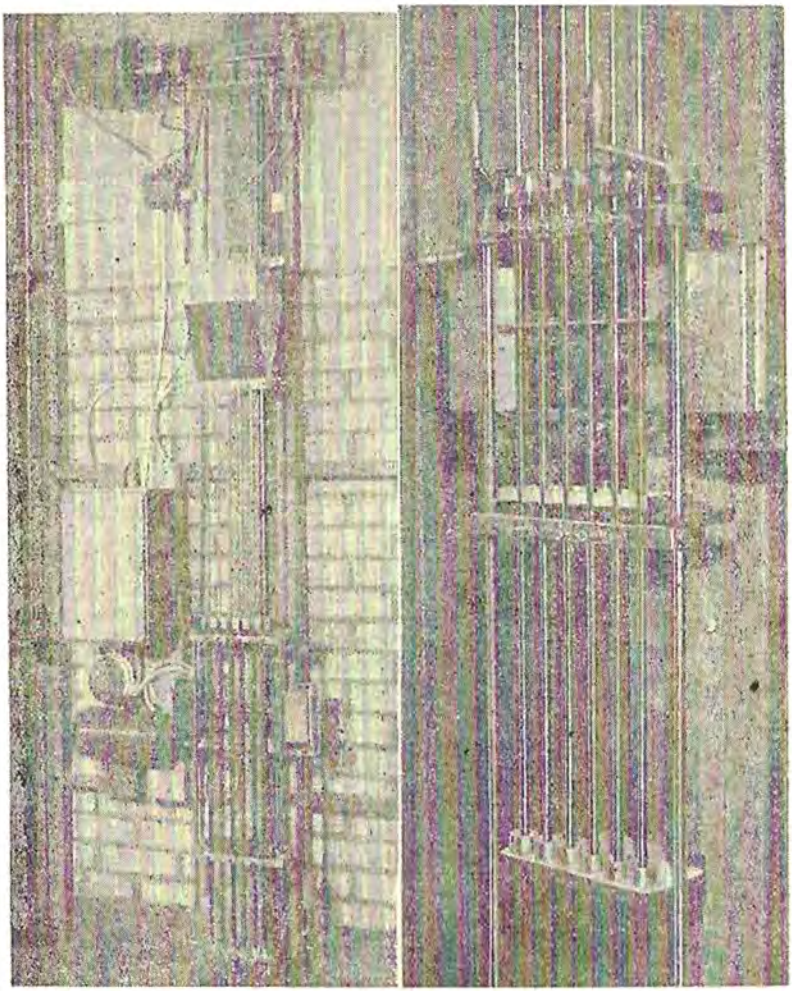


Fig. 5.6. Mașină de umplut tuburi.

avantajul unui preț de cost ridicat și necesitatea sortării pe dimensiuni ale diametrului. Acest lucru este eliminat la fișele cu capăt conic care pot fi folosite la orice diametru al spiralei.

Parametrii sudării: tensiunea secundară, timpul de sudură și presiunea electrozilor pe materialul de sudat sînt dați în instrucțiunile de deservire a diverselor tipuri de mașini de sudat și se reglează în funcție de rezultatele obținute la lotul de încercare.

Umplerea tubului cu praf izolant. Dacă pentru realizarea diferitelor operații de executare ale elementelor încălzitoare există multe variante tehnologice, umplerea se realizează numai pe mașini speciale care trebuie să asigure condiția esențială de concentricitate a spiralei față de tub în timpul îndesării prin vibrare a prafului izolant. O astfel de mașină construită de firma Kanthal pentru umplerea simultană a 6 tuburi este arătată în fig. 5.6. Capul de umplere al mașinii este reprezentat în fig. 5.7 iar dimensiunile uzuale ale țevilor exterioare de um-

Tabelul 5.2

Dimensiunile țevilor exterioare de umplere în funcție de tubul elementului încălzitor

Diametrul țevii exterioare de umplere, mm	Dimensiunile tubului (diametrul exterior × grosimea peretelui), mm
4,75	6×0,5
6,50	8×0,5
7,50	9×0,5
8,65	10×0,5 (11×1)
10,00	13×1,0 (12×0,5)
10,65	14×1

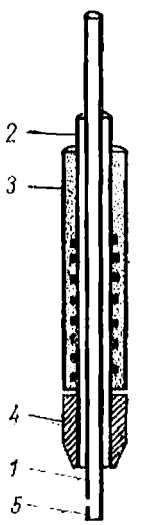


Fig. 5.7. Cap de umplere:
1 — tija de fixare a știftului de contact; *2* — țeava interioară de umplere; *3* — țeava exterioară de umplere; *4* — diuza de umplere; *5* — dispozitiv de suspendare.

plere în tabelul 5.2. Între țevile de umplere interioare și exterioare se află praful izolant care prin vibrare cu o frecvență de 25—35 perioade/secundă, curge

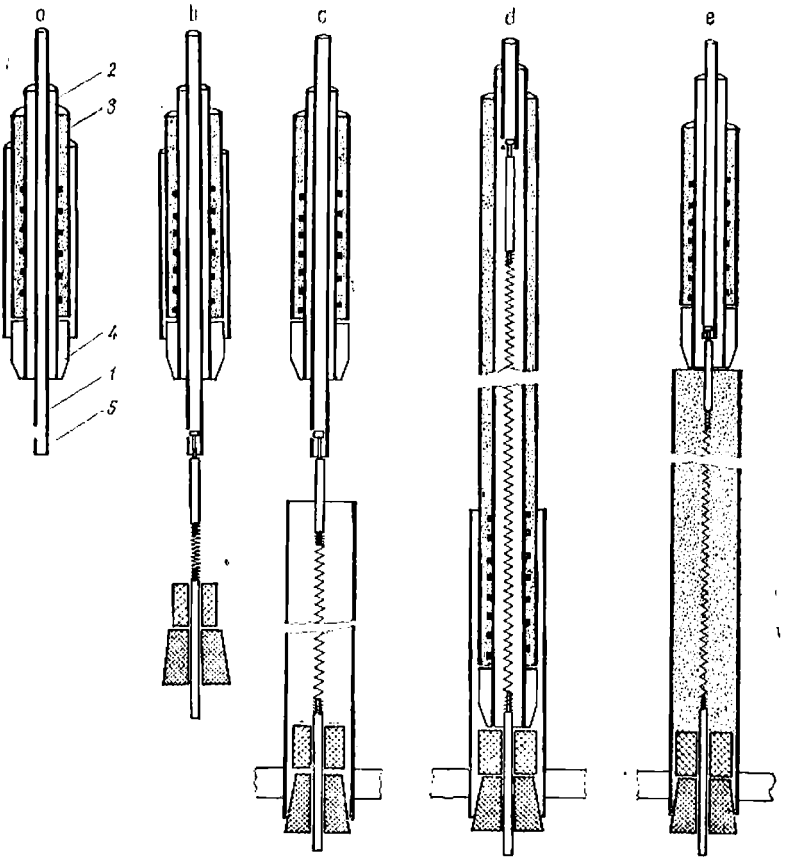


Fig. 5.8. Fazele tehnologice de umplere a tubului:

1 — tub metalic tras pe țeava de umplere; *2* — spirala pregătită pentru introducerea în tub metalic; *3* — tub metalic coborît pe spirală, fixat pentru umplere; *4* — țeava de umplere introdusă în tub metalic. Pornirea umplerii. *5* — țeava de umplere retrasă — umplerea terminată.

prin diuza de umplere în tubul elementului încălzitor în care a fost introdusă la începutul operației. Capul de umplere, simultan cu vibrarea, este ridicat cu viteza de

150 mm/min pînă în momentul ieşirii din tubul elementului încălzitor, cînd se opreşte automat şi vibrarea.

Succesiunea operaţiei de umplere este arătată în fig. 5.8, iar în fig. 5.9 sînt reprezentate ţevile de um-

Fig. 5.9. Maşină de umplut tuburi tip Kanthal.

plere, capetele de umplere şi tuburile elementelor încălzitoare la o maşină tip Kanthal.

După terminarea operaţiei de umplere se introduce la capătul superior al tubului izolatori de ghidare şi dopul tehnologic de închidere din material plastic.

Comprimarea elementului încălzitor în tub. Această operaţie are ca scop obţinerea unei densităţi cît mai ridicate a prafului izolant, valoarea acesteia precum şi granulozitatea influenţînd în mod pozitiv conductivitatea termică (vezi diagrama din fig. 3.4).

Practica a arătat că metoda comprimării prin laminare este mult mai avantajoasă faţă de forjarea rotativă care modifică mult granulozitatea prafului izolant datorită loviturilor repetate ale ciocanelor de forjare. În ţara noastră, pentru comprimarea tubului elementului încălzitor se foloseşte laminarul tip Kanthal-Oakley cu 8 şi 10 perechi de valţuri pentru comprimarea tuburilor cu diametrul de 12 mm şi 14 mm. Valţurile sînt executate din metale dure sau din oţel crom-nichel.

La executarea operației de comprimare, trebuie să se observe că la laminare tuburile se introduc în laminor cu capătul care la umplere în mașina de umplut a fost orientat în jos, prin aceasta urmărindu-se compensarea variației densității de umplere a prafului de izolant care scade către capătul superior al elementului încălzitor. De asemenea, la tuburile cu diametre finale de 10—11 mm se poate întîmpla ca la capetele tubului, în apropierea fișelor de contact, praful să aibă o densitate mult mai mică decît în restul elementului încălzitor, această inegalitate datorîndu-se alungirii neuniforme a fișei de contact și a tubului. Urmare acestei situații o constituie înrăutățirea conductivității termice la capătul spiralei și pericolul de supraîncălzire a acesteia.

Singura posibilitate de a evita această dificultate la elementele încălzitoare groase este o operație auxiliară de presare a elementului încălzitor în locurile cri-

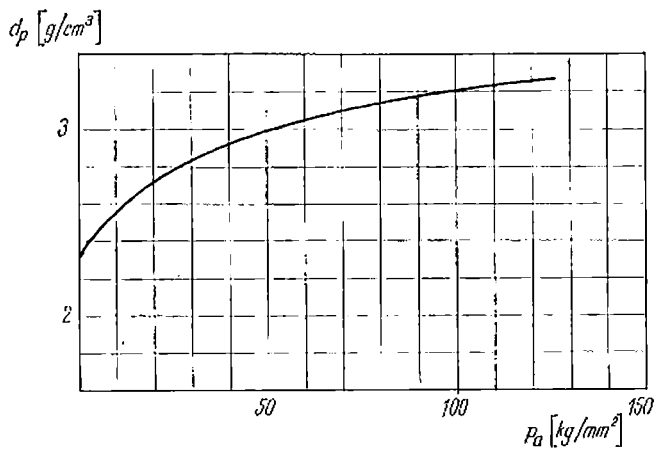


Fig. 5.10. Densitatea oxidului de magneziu în funcție de valoarea presiunii de comprimare.

tice. La elementele încălzitoare de diametre mai mici această problemă este de importanță mai redusă.

Gradul normal de reducție pentru elementele încălzitoare este circa 16%, deși o țeavă cu un diametru

exterior de 9,5 mm se reduce de obicei la 8,0 mm. Astfel, la elementele încălzitoare pentru plite, acestea se comprimă mai întîi într-un laminor cu circa 10%, și după îndoire la forma cerută se aduc la densitatea normală a prafului prin presare. În diagrama din fig. 5.10 este reprezentată dependența dintre presiune de presare p_a și densitatea prafului (d_p).

Recoacerea elementului încălzitor în tub. Pentru a preveni ruperea materialului la îndoire, elementele încălzitoare sînt supuse unei recoaceri de înmuiere. Aceasta se face fie în cuptoare cu mișcare continuă care dau cele mai bune rezultate, fie prin recoacere inductivă sau recoacerea locală în zona de îndoire cu arzătoare, iar cîte odată chiar cu spirala proprie a elementului încălzitor. Încălzirea cu spirale proprii de încălzire se aplică la elementele încălzitoare executate din materiale cu temperatură de recoacere mică, cum sînt cuprul și aluminiul. Temperatura de recoacere este diferită fiind funcție de materialele folosite, astfel țevile de aluminiu se recoc la circa 480°C, țevile de cupru și alamă la circa 600°C, țevi de oțel la o temperatură de 800—900°C, iar țevile înalt aliate la 1000—1100°C. Pentru obținerea unor rezultate optime este necesară menținerea constantă a temperaturii de recoacere și controlarea parametrilor temperatură-timp. În general, temperaturile de recoacere prea ridicate sau durata de recoacere prea lungă, înrăutățesc proprietățile mecanice ale țevilor. Se va avea în vedere ca țevile inoxidabile să fie recoapte la limita temperaturii inferioare, respectiv la 1000°C timp de 30 la 60 minute.

Fasonarea. După recoacere tubul poate fi supus operației de fasonare pentru a căpăta forma dorită. În acest sens, trebuie să se țină seama de faptul că folosirea razelor mici de îndoire trebuie evitate îndeosebi la oțelurile aliate pentru a preveni apariția crăpăturilor în această zonă. Raza interioară minimă de curbură a tubului din cupru și oțel moale trebuie să fie 1—1,2 ori diametral tubului, iar la oțelurile de 1,5 ori diametral tubului. Valoarea minimă recomandată pentru raza de

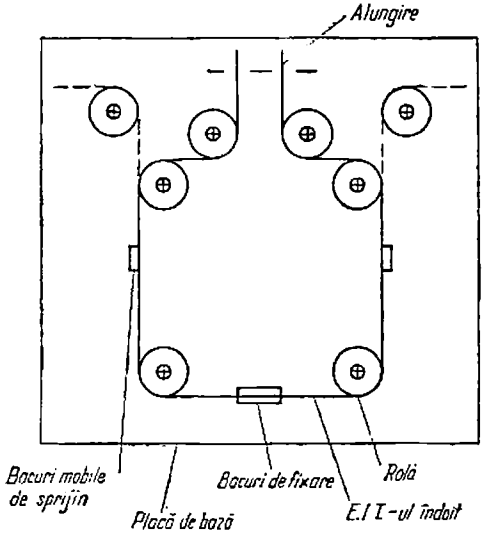


Fig. 5.11. Schema de îndoire a unui element încălzitor.

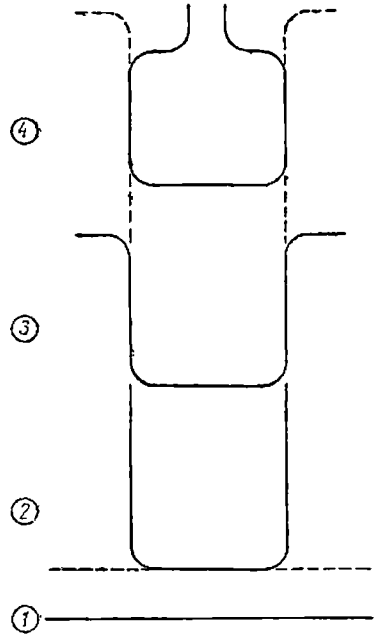


Fig. 5.12. Succesiunea operațiilor de îndoire.

îndoire este de 2 ori diametrul tubului, iar operația să se facă pe porțiunea activă a acestuia (și în nici un caz pe porțiunea fișelor).

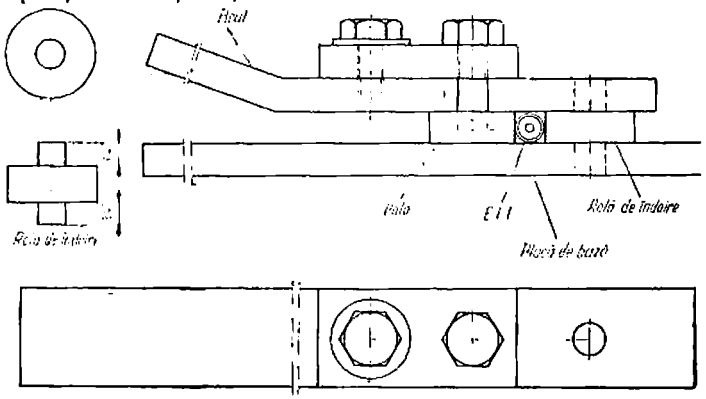


Fig. 5.13. Dispozitiv de îndoire manual.

În fig. 5.11, 5.12 și 5.13 sînt arătate scheme de îndoire a unui element încălzitor, succesiunea operațiilor de îndoire și schema dispozitivului de îndoire manual.

După cum s-a arătat anterior, conductivitatea termică a prafului izolant și rezistența de izolare scade odată cu reducerea densității ce se produce la indoirea tubului. Pentru evitarea acestui lucru, este necesar ca după îndoire să se execute o operație de aplatisare prin presare care să readucă densitatea prafului izolant la valoarea inițială.

În fig. 5.14 este arătată schema sculei pentru presarea unui element încălzitor cu colțuri dreptunghiulare, executată din

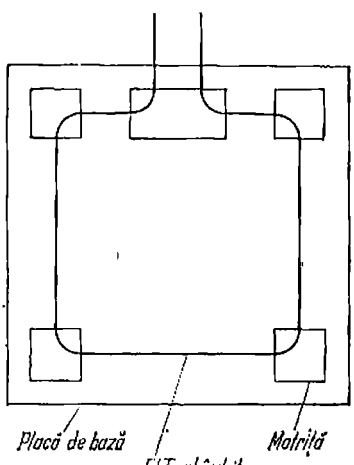


Fig. 5.14. Schema sculei pentru presarea colțurilor elementului încălzitor.

elemente detașabile care însă poate fi executată și dintr-o bucată.

În fig. 5.15 și 5.16 este arătat cotul elementului încălzitor după presare și nutul sculei de presare.

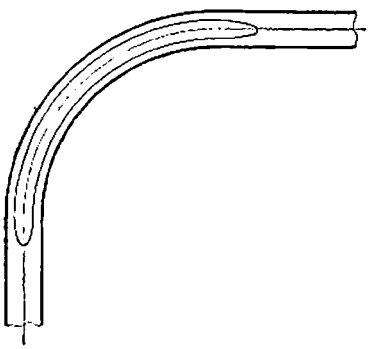


Fig. 5.15. Cotul elementului încălzitor îndoit după presare.

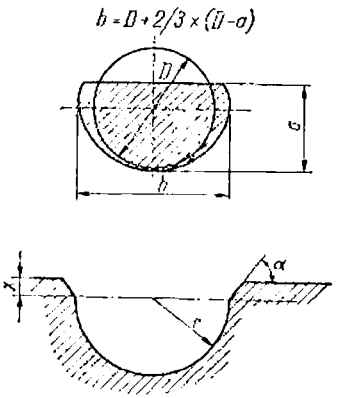


Fig. 5.16. Nutul sculei de presare.

Pentru stabilirea profilului nutului pentru presarea de aplatizare (vezi fig. 5.16) se poate folosi următoarea formulă empirică:

$$b = D + \frac{2}{3}(D - a)x \qquad (5.1)$$

Mărimea lui a trebuie determinată de la caz la caz și poate să varieze între limitele $(0{,}85—0{,}9)D$. Raza r a nutului este egală cu $\frac{b}{2}$ + jocul, iar jocul are valoarea de 0,05—0,08 mm și este funcție de rază.

Valoarea unghiului α este în general de 45°, cu excepția acelor cazuri cînd este vorba de elemente încălzitoare în tub în formă de spirală de tip plită, cînd din cauza distanțelor prea mici între spirale valoarea lui α trebuie să fie mai mare. Valoarea lui x este de 1,3 mm.

Închiderea capetelor elementelor încălzitoare. Pătrunderea în elementele încălzitoare a umidității și a

impurităților sub formă de săruri, oxizi sau gaze, face ca rezistența de izolație a spiralei față de sub să scadă astfel, încît curenții de scurgere ce se nasc să atingă valori periculoase conducînd chiar și la scurtcircuit. Pentru a împiedeca acest lucru capetele elementelor încălzitoare trebuie etanșate perfect, operație ce se face după ce au fost îndepărtate dopurile tehnologice de la capete și terminată operația de fasonare.

Metodele folosite pentru etanșarea capetelor depind în primul rînd de regimul de funcționare al elementului încălzitor.

În general, la etanșarea capetelor elementelor încălzitoare sînt utilizate izolatoare sau mărgele de capăt din material ceramic (steatită, porțelan etc.). Acestea sînt lipite de fișa de contact și de suprafața interioară a tubului cu cauciuc siliconic, cimenturi sau sticle ușor fuzibile.

Alegerea soluției adoptate pentru închiderea elementului încălzitor trebuie făcută în funcție de următorii factori:

— mediul în care funcționează: apă, aer, în plite turnate, în atmosferă umedă sau uscată etc.;

— regimul permanent sau intermitent de funcționare;

— temperatura capătului tubului care se atinge în exploatare;

— considerente economice.

Cel mai folosit material la închiderea elementului încălzitor este siliconul sub formă de lac, ulei sau cauciuc siliconic care și-a găsit o utilizare largă datorită rezistenței bune pe care o are la temperaturi de circa 250°C.

Trebuie remarcat că după aplicarea lacului siliconic, capătul tubului se supune de obicei unei încălziri de 200—250°C, timp de cîteva ore, în scopul obținerii unui film protector dur și tenace. Această metodă se folosește în cazurile în care distanța între știft și peretele tubului permite acest lucru.

Uleiul siliconic se folosește în anumite cazuri și ca liant în cimenturi ceramice ale căror componente principale sînt talcul, oxidul de magneziu și oxidul de aluminiu, caz în care capătul tubului trebuie supus de asemenea tratamentului termic. În funcție de temperatura aplicată se pot obține diferite grade de plasticitate a cimentului.

Cauciucul siliconic se folosește sub formă de dop elastic sau sub formă de pastă care se întărește prin tratament termic. Dopurile din cauciuc siliconic sînt folosite la elementele încălzitoare ale reșourilor pe cînd pastele din cauciuc siliconic sînt folosite aproape în exclusivitate ca mărgele de capăt.

În cazurile în care temperatura de exploatare depășește 250°C, pentru închiderea tubului se folosesc sticle sub formă de praf care conțin silicol sau oxid de plumb care se reduc foarte ușor încălzite în cuptoare electrice, după care se aplică corpul ceramic de închidere.

În funcție de compoziție, temperatura de topire a sticlei variază între 600 și 900°C și ea trebuie astfel aleasă încît diferența între temperatura elementului încălzitor și temperatura de topire să fie cel puțin 200°C, lucru necesar pentru a nu micșora rezistența de izolație a sticlei care scade cu creșterea temperaturii.

În cazuri speciale, cînd temperatura capătului elementului încălzitor nu depășește valoarea de 100°C, cum este cazul la elementele încălzitoare folosite la încălzirea apei cu o putere specifică redusă a suprafeței tubului (sub 7 W/cm^2), se pot folosi materiale organice pentru închidere, ca de exemplu, rășini alchidale, sau rășini de turnare.

În afară de materialele enumerate mai sus se folosesc pentru închiderea elementelor încălzitoare și diferite tipuri de cimenturi anorganice, care însă au dezavantajul că conțin apă care preluată de praful izolant conduce la creșterea curenților de scurgere.

În cele ce urmează se vor da cîteva exemple de elemente încălzitoare cu fișe de contact și diverse închideri.

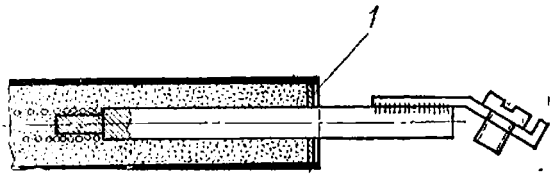


Fig. 5.17. Închiderea tubului cu lac siliconic.

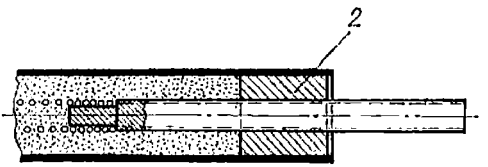


Fig. 5.18. Închiderea tubului cu dop.

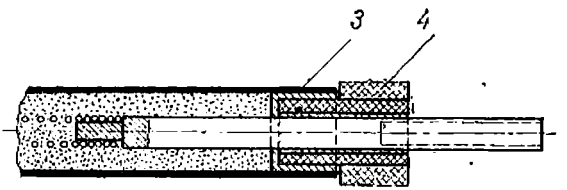


Fig. 5.19. Închiderea tubului cu corpuri ceramice.

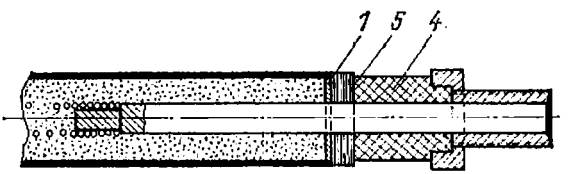


Fig. 5.20. Închiderea tubului cu rondele de micanită și un corp ceramic.

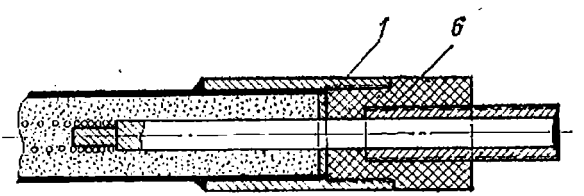


Fig. 5.21. Închiderea prin țeavă și lipitură tare.

În fig. 5.17 închiderea constă dintr-un strat subțire de lac siliconic, rășină alchidică, email sau alte materiale izolatoare care pot fi aplicate într-un strat subțire. Fișa de contact este din bară pe care este fixată o plăcuță cu un șurub sau cu fișa plată pentru legarea la rețea.

În fig. 5.18, pentru închidere, este folosit un dop dintr-un material plastic (cauciuc siliconic, diferite tipuri de cimenturi ceramice, rășini de turnare). La această formă de închidere nu se folosesc materiale speciale pentru lipire, respectiv completarea spațiului între dop și tub sau între dop și fișa de contact. Această soluție presupune o temperatură mai redusă la capătul tubului și o etanșare mai puțin perfectă. Fișa de contact în această formă de închidere este executată din bară rotundă filetată pe toată lungimea ei.

În fig. 5.19 corpurile ceramice de închidere 4 sînt din steatită sau porțelan, iar umplerea spațiului dintre tub și fișă este realizată din sticlă ușor fuzibilă, cauciuc siliconic sau ciment. Se observă că materialul de umplere pătrunde în spațiile dintre dop și fișă de contact care este filetat numai pe porțiunea exterioară, sau în cele mai multe cazuri nefiletat și prevăzut au fișă plată de legătură.

În fig. 5.20 închiderea constă din rondele de micanită și un corp ceramic care sînt fixate de o rondelă și o bucșă filetată trasă pe fișa de contact și fixată de aceasta prin lipire.

În fig. 5.21 la tubul elementului încălzitor este lipită o țeavă filetată la interior în care este înșurubat un corp izolator (exemplu Mycalex). O bucșă metalică este înșurubată în corpul izolator. Această bucșă metalică este trasă pe fișa de contact și lipită prin lipitură tare. Prin această soluție se obține o închidere foarte bună, în special dacă filetele sînt unse cu lac siliconic.

6. Verificarea, defectele şi durata de viaţă a elementelor încălzitoare electrice

În vederea asigurării unei funcţionări normale, precum şi în scopul prevenirii unor defecţiuni ulterioare în exploatare, elementele încălzitoare trebuie supuse unor încercări şi verificări de către întreprinderile producătoare şi anume:

— Verificarea de ansamblu care constă în examinarea aspectului general şi al asamblării. Se vor verifica, de asemenea, dimensiunile şi materialele utilizate care trebuie să corespundă normelor interne şi caietelor de sarcini. La asamblare se va avea în vedere, în special, etanşeitatea tubului în scopul depistării fisurilor care ar fi putut să apară în procesul de laminare sau îndoire şi nu au fost puse în evidenţă la proba de rigiditate.

— Verificarea continuităţii circuitului.

— Verificarea izolaţiei. Rezistenţa izolaţiei trebuie să fie de minimum 2 MΩ şi se măsoară între piesele conductoare de curent şi carcasa elementului. Aparatul folosit pentru această verificare este megaohmetrul. Verificarea la rigiditate dielectrică se face în stare rece şi uscată la o tensiune de 1 250 V pentru elementele încălzitoare destinate uzului general şi la o tensiune de 1 500 V la cele cu destinaţie specială. Timpul de încercare este de 1 minut prin scăderea progresivă a tensiunii pe o durată de 30 secunde inclusă în timpul de 1 minut. În timpul

încercării nu trebuie să apară străpungeri sau conturări ale izolației.

— Verificarea fixării cordonului de alimentare, care se face aplicînd asupra acestuia timp de o secundă o forță de tracțiune de 60 kgf și un cuplu de 0,25 kgf·m; încercarea se repetă de 25 ori.

— Verificarea fișelor de conexiune.

— Verificarea puterii absorbite. Limitele admisibile pentru abateri sînt de + 7,5% la 5% față de puterea nominală.

Defecțiunea cea mai frecvent întîlnită în exploatarea elementelor încălzitoare o constituie întreruperea continuității sîrmei de rezistență. Cauzele care conduc la această defecțiune se datoresc supraîncălzirii, executării necorespunzătoare a operației de sudură dintre spirală și fișele de contact, precum și datorită presării exagerate în vederea aplatisării tubului la îndoirea acestuia. Prezența impurităților în izolație și existența fisurilor pot constitui, de asemenea, cauze de defectare. Acestea se pot depista cu ajutorul sunetelor produse de arcul electric la încercările la tensiuni înalte. Astfel, sunetele sub formă de zumzet indică existența unor impurități în izolație, iar sunetele ascuțite indică existența fisurilor sau un scurtcircuit.

Avînd în vedere temperaturile ridicate și mediul în care funcționează, cercetarea duratei de viață a elementelor încălzitoare are importanță pentru calitatea și fiabilitatea elementelor încălzitoare. În acest sens, la elementele încălzitoare care lucrează la o temperatură de pînă la 500°C, durata de viață nu constituie, în general, o problemă de calitate, în schimb pentru cele care lucrează la temperaturi de peste 650°C durabilitatea constituie un indice cert de calitate.

În procesul tehnologic de fabricație, în cazul folosirii sîrmei Kanthal, se poate constata că rezistența la rece a acesteia suferă o anumită schimbare legat de timpul de exploatare. În cazul încălzirii conținutul de aluminiu al sîrmei scade și prin urmare scade și rezistența electrică. Viteza cu care scade aceasta, depinde de temperatură și de raportul între suprafață și volum. La

sîrme de rezistență Kanthal cu diametrul pînă la 0,45 mm se consideră ca limită a duratei de viață dacă rezistența la rece scade cu circa 30%. La sîrme mai groase această relație nu este stabilită în mod cert. În vederea evitării unor greșeli, s-a stabilit ca limită maximă a scăderii rezistenței la rece valoarea de 24%. Valoarea normală pentru durabilitatea dorită a unui element încălzitor este de circa 5 000 ore de funcționare. Din studiile efectuate de firma Bulten-Kanthal rezultă că această durabilitate corespunde unei schimbări a rezistenței la rece de 3—4%, după o sută de ore de funcționare. De asemenea, s-a constatat că o schimbare de 2% a rezistenței la rece, după o sută ore funcționare, corespunde unei durabilități de 20 000 ore de funcționare; în schimb, o schimbare de 6% corespunde unei durabilități de 1 500 ore. Menționăm că cercetările se referă la sîrme cu un diametru de pînă la 0,45 mm.

Cuprins

1. **Generalităţi** 3

2. **Noţiuni de electrotehnică şi termotehnică** 14

3. **Materiale folosite în fabricaţia părţilor componente ale elementelor încălzitoare în tuburi metalice** 22

   3.1. Materiale pentru sîrma de rezistenţă 22
   3.2. Materiale izolante pentru elementele încălzitoare . . 40
   3.3. Materiale pentru bucşa de ghidare şi izolatorii de capăt 52
   3.4. Materiale pentru tubul metalic 53
   3.5. Materiale pentru fişele de contact 86

4. **Calculul şi dimensionarea elementelor încălzitoare în tuburi metalice** 87

   4.1. Influenţa factorilor tehnologici şi funcţionali asupra parametrilor folosiţi la proiectarea elementelor încălzitoare în tuburi metalice 87
   4.2. Dimensionarea tubului 117
   4.3. Dimensionarea spiralei de încălzire 118
   4.4. Calculul rezistenţei minime de izolare 142

5. **Tehnologia de fabricaţie a elementelor încălzitoare electrice în tub** 144

6. **Verificarea, defectele şi durata de viaţă a elementelor încălzitoare electrice** 165

Caracteristicile tehnice / Denumirea elementului încălzitor	Element încălzitor pentru mașina automată de spălat rufe — fig. 1.2	Element încălzitor pentru radiator post-conducere locomotivă diesel electrică — fig. 1.3	Element încălzitor pentru mecanism oleo-pneumatic al întreruptoarelor de înaltă tensiune — fig. 1.4	Corp încălzitor pentru vagoane de călători — fig. 1.5	Element încălzitor pentru încălzirea matrițelor de formare la cald — fig. 1.6	Element încălzitor pentru încălzirea matrițelor de formare la cald — fig. 1.7	Element încălzitor pentru radiator electric cu ulei — fig. 1.8	Element încălzitor pentru radiator electric cu ulei — fig. 1.9	Încălzitor de apă prin imersie — fig. 1.10	Element încălzitor cu utilizare multiplă — fig. 1.11	Element încălzitor cu utilizare multiplă — fig. 1.12	Element încălzitor pentru grătare electrice — fig. 1.13	Element încălzitor pentru plite electrice cu cuptor — fig. 1.14	Element încălzitor pentru agregatul de încălzire locomotive electrice — fig. 1.15	Element încălzitor pentru mașina de spălat rufe — fig. 1.16	Element încălzitor pentru mașina de spălat rufe — fig 1.17	Element încălzitor pentru incubator — fig. 1.18
Puterea, W	2 300	380	500	1 500	400 425 500 750	850 1 000 1 100 1 200 1 500	1 000 1 500 1 650 2 000	900 1 250 1 500 1 800	2 000	50 la 2 500	50 la 2 000	800	300 400 700	1 000	1 900	1 100	1 000
Tensiunea, V	220	380	220	500	220	220	220	220	220	24 220 380	24 220 380	220	220	380	220	110	220
Încărcarea specifică a tubului W/cm²	11,5	1,45	2	3,7	6,5	6,5	6,6	4	7,25	0,5 la 10	0,5 la 10	1,85	0,7 0,95 1,65	3	8	8	8
Materialul tubului	Inox	OLT 35	OLT 35	Inox	Inox	Inox	OLT 35	alamă	OLT 35	alamă cupru OLT 35 Inox	alamă cupru OLT inox	aluminiu	OLT 35	OLT 35	cupru	cupru	cupr
Lungimea tubului L, mm	259	402	368	395	—	—	317 455 547 630	300 440 525 610	398	100 la 1 250	100 la 3 000	153	374	374	210	200	120
Mediul de funcționare	apă	aer	aer	aer	Contact cu metal	Contact cu metal	ulei	ulei	apă	aer, ulei apă contact cu metal	aer, ulei, apă, contact cu metal	Contact cu metal	aer	aer	apă	apă	alt

Tabelul 1.1

lelle funcţionale şi constructive ale elementelor încălzitoare produse în ţară

Element încălzitor cu utilizare multiplă — fig. 1.12	Element încălzitor pentru grătare electrice — fig. 1.13	Element încălzitor pentru plite electrice cu cuptor — fig. 1.14	Element încălzitor pentru agregatul de încălzire locomotive electrice — fig. 1.15	Element încălzitor pentru maşina de spălat rufe — fig. 1.16	Element încălzitor pentru maşina de spălat rufe — fig 1.17	Element încălzitor pentru incubator — fig. 1.18	Încălzitor de apă pentru motoarele locomotivelor diesel — fig.1.19	Element încălzitor pentru resurse locomotivelor electrice — fig 1.20	Încălzitor de apă prin inersie (termoplonjor) — fig. 1.21	Încălzitor de apă prin inersie (termoplonjor) — fig. 1.22	Încălzitor de apă prin inersie (termoplonjor) — fig. 1.23	Element încălzitor pentru camere frigorifice navale — fig. 1.24	Element încălzitor pentru camere frigorifice navale — fig. 1.25	Element încălzitor pentru incubatoare — fig. 1.26	Element încălzitor pentru maşina de gătit electrică — fig. 1.27	Element încălzitor pentru maşina de gătit electrică — fig. 1.28	Element încălzitor pentru producerea aburului supraîncălzit în saune — fig. 1.29	Element încălzitor pentru încălzitor de apă curentă — fig. 1.30	Element încălzitor pentru încălzitor de apă cu acumulare — fig. 1.31
50 la 2 000	800	300 400 700	1 000	1 900	1 100	1 000	3×4 500	600	400	500	750	2 000 50	50	1 200 1 500	2 000	1 200	1 700	2 000	2 000
24 220 380	220	220	380	220	110	220	220/380	380	220	220	220	380/220	220	320	220	220	220	220	220
0,5 la 10	1,85	0,7 0,95 1,65	3	8	8	8,8	6,2	2	8	4,5	5,6	2,9 0,12	0,12	2,5 3,2	4	4,4	1,85	8,7	8,5
alamă cupru OLT inox	aluminiu	OLT 35	OLT 35	cupru	cupru	cupru	alamă	alamă	alamă	alamă	alamă	inox	inox	inox	inox	inox	inox	cupru	cupru
100 la 3 000	153	374	374	210	200	120	548	Ø 160	150	250	250	555 532	532	1 800 Ø 350	309	379	548,6	140	161
aer, ulei, apă, contact cu metal	Contact cu metal	aer	aer	apă	apă	abur	apă	contact cu metal	apă	apă	apă	aer	aer	aer	aer	aer	aer + abur	apă	apă